SEE
FOLLOWING
NOTE

VOIR
NOTE
CI-APRÈS

PARTS OF THE ORIGINAL DOCUMENT

ARE OF POOR REPRODUCTIVE QUALITY

CERTAINES PARTIES DU DOCUMENT ORIGINAL

SONT DE PIÈTRE QUALITÉ DE REPRODUCTION

INTRODUCTION À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Québec

87-03275/

INTRODUCTION
À LA
POLLUTION
ATMOSPHÉRIQUE

INTRODUCTION À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

par
Michel Bisson
Ministère de l'Environnement
Direction de l'assainissement de l'air

Québec

Le contenu de cette publication a été préparé
par le ministère
de l'Environnement

Cette publication a été produite par
Les Publications du Québec

Dépôt légal — 4e trimestre 1986
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-551-08762-7

© Gouvernement du Québec

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout le personnel de la Direction de l'assainissement de l'air, et plus particulièrement Raynald Brulotte, Claude Lelièvre et Richard Leduc, pour leur précieuse collaboration sans laquelle ce document n'aurait pu être réalisé.

Michel Bisson

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux 9
Liste des figures 10
Introduction 13

1. *L'atmosphère: quelques notions de base* 17
   1.1 La structure de l'atmosphère 17
   1.2 La composition de l'air 18
2. *Les contaminants de l'atmosphère* 23
   2.1 Les matières particulaires 23
   2.2 Les contaminants gazeux 23
      2.2.1 Les composés du soufre 25
      2.2.2 Les oxydes d'azote 26
      2.2.3 Les composés gazeux du carbone 27
      2.2.4 Autres contaminants primaires 27
      2.2.5 L'ozone 28
      2.2.6 Les contaminants radioactifs 29
      2.2.7 Les odeurs 29
3. *Le cycle de la pollution atmosphérique* 30
   3.1 L'émission des contaminants 35
   3.2 La diffusion et le transport des contaminants 36
      3.2.1 La turbulence thermique 37
      3.2.2 La turbulence mécanique 37
      3.2.3 Le vent 43
      3.2.4 Influences de certaines conditions météorologiques sur la qualité de l'atmosphère 43
      3.2.5 Quelques exemples d'influences topographiques sur la dispersion des contaminants atmosphériques 44
   3.3 Les mécanismes d'élimination des contaminants et leur durée de séjour dans l'atmosphère 44
4. *Les effets des contaminants atmosphériques* 47
   4.1 Les effets sur les êtres humains 53
      4.1.1 Le mode d'action et les effets des contaminants sur l'organisme 53
      4.1.2 Évaluation de l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé 53
   4.2 Les effets sur les animaux 58
   4.3 Les effets sur la végétation 59
   4.4 Les effets sur les matériaux 59
   4.5 Les effets sur le milieu atmosphérique 61
   4.6 Les aspects socio-économiques 63
5. *La mesure et l'évaluation de la qualité de l'atmosphère* 63
   5.1 La mesure des contaminants à l'émission 67
   5.2 La mesure des contaminants dans l'atmosphère 67

5.2.1 Les particules 68
5.2.2 Les contaminants gazeux 68
5.2.3 Les odeurs 69
5.3 Les réseaux d'échantillonnage 69
5.4 La télédétection de la pollution atmosphérique 70
5.5 Les modèles mathématiques 70

6. *La prévention des problèmes de pollution atmosphérique* 75
6.1 L'action à la source 75
6.2 L'épuration des effluents atmosphériques 76
6.2.1 Les épurateurs de particules 77
6.2.2 Les épurateurs de gaz et d'odeurs 81
6.2.3 Le traitement des émissions provenant des véhicules à moteur 83
6.3 L'aménagement du territoire 85
6.4 Les systèmes de contrôle intermittent 86
6.5 L'information, l'éducation et la formation 86

7. *La gestion du milieu atmosphérique* 89

8. *La pollution atmosphérique au Québec* 93
8.1 Les émissions de contaminants atmosphériques 93
8.2 Le réseau de surveillance de la qualité atmosphérique 96
8.3 Aperçu de la qualité de l'atmosphère au Québec 99
8.4 Les effets sur les récepteurs 104
8.4.1 Effets de la pollution atmosphérique à l'échelle locale 104
8.4.2 Effets de la pollution atmosphérique à l'échelle synoptique 104
8.5 La gestion du milieu atmosphérique au Québec 106

Annexe 1: *Calcul de dispersion* 109
Annexe 2: *Quelques normes touchant la qualité de l'atmosphère au Québec* 117

Bibliographie 123
Lexique 127
Où s'informer 135

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: Composition de l'air sec (en proportion relative) 19
TABLEAU 2: Estimation des émissions mondiales annuelles de matières particulaires dans la troposphère 25
TABLEAU 3: Estimation des émissions mondiales annuelles des principaux contaminants gazeux 26
TABLEAU 4: Environnements géographiques et échelles spatiales de représentativité 35
TABLEAU 5: Résumé des mécanismes d'élimination de certains contaminants atmosphériques 49
TABLEAU 6: Liste abrégée de quelques espèces végétales sensibles au dioxyde de soufre et au fluorure d'hydrogène 61
TABLEAU 7: Dommages causés par la pollution atmosphérique à divers matériaux 62
TABLEAU 8: Taux d'émission de différentes sources énergétiques 76
TABLEAU 9: Principales caractéristiques des divers types d'épurateurs 77
TABLEAU 10: Émissions atmosphériques des principaux contaminants en fonction des secteurs d'activité au Québec (1978) 94
TABLEAU 11: Émissions de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote au Québec en 1980 96
TABLEAU 12: Répartition des mesures d'échantillonnage dans les agglomérations québécoises par région administrative, avril 1985 98

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: Profil vertical de la température dans l'atmosphère et nomenclature de ses subdivisions 18
FIGURE 2: Diamètre de divers types de particules atmosphériques 24
FIGURE 3: Interaction des contaminants responsables de la formation des brouillards photochimiques 30
FIGURE 4: Le cycle de la pollution atmosphérique 36
FIGURE 5: Effets des conditions de stabilité atmosphérique sur le comportement d'une particule d'air 38
FIGURE 6: Exemples de comportement de panache selon la structure verticale de la température 40
FIGURE 7: Influence du cycle quotidien du gradient thermique sur le comportement d'un panache (par vent faible et ciel dégagé) 41
FIGURE 8: Modification du gradient thermique nocturne en milieu urbain (par vent faible et ciel dégagé) 42
FIGURE 9: Effets d'un bâtiment et de la hauteur d'une cheminée sur la dispersion des contaminants atmosphériques 42
FIGURE 10: Vent en altitude et vent au sol 43
FIGURE 11: Effets de littoral lorsque les vents sont légers 45
FIGURE 12: Enfumage du littoral associé à un vent soufflant de la mer 46
FIGURE 13: Vent anabatique et vent de vallée; vent katabatique et vent de montagne 46
FIGURE 14: Effet de vallée 47
FIGURE 15: Processus de dépôt humide 48
FIGURE 16: Processus de dépôt sec 48
FIGURE 17: Échelles spatiales de la pollution atmosphérique en fonction du temps et de la distance de transport 50
FIGURE 18: Modèle du cheminement des contaminants atmosphériques dans le corps humain 54
FIGURE 19: Effets du SO_2 sur les êtres humains en fonction de diverses expositions 55
FIGURE 20: Système respiratoire et pénétration des particules selon leur diamètre 56
FIGURE 21: Dépôt des particules dans le système respiratoire selon leur diamètre 57
FIGURE 22: Effets des contaminants atmosphériques sur la végétation et autres facteurs impliqués 60
FIGURE 23: Schéma général du processus d'épuration des effluents 76
FIGURE 24: Diamètre optimum des particules retenues par certains épurateurs 78
FIGURE 25: Dépoussiéreur à force centrifuge (cyclone) 79
FIGURE 26: Dépoussiéreur hydraulique (laveur à gravité) 79
FIGURE 27: Dépoussiéreur à filtres (sacs filtrants) 80
FIGURE 28: Dépoussiéreur électrostatique 80
FIGURE 29: Épurateur par adsorption et régénération biologique 82

FIGURE 30: Épuration par combustion 83
FIGURE 31: Convertisseurs catalytiques à deux et à trois voies 84
FIGURE 32: Efficacité des convertisseurs catalytiques en fonction du rapport air — essence 85
FIGURE 33: Répartition des émissions atmosphériques en fonction des principaux contaminants, Québec (1978) 94
FIGURE 34: Répartition des émissions atmosphériques en fonction des principaux secteurs d'activité, Québec (1978) 94
FIGURE 35: Répartition proportionnelle des émissions atmosphériques provenant des principaux secteurs d'activité en fonction des principaux contaminants, Québec (1978) 95
FIGURE 36: Répartition dans les régions administratives des agglomérations urbaines québécoises de plus de 25 000 habitants en fonction de la taille en 1981 97
FIGURE 37: Poste d'échantillonnage: maisonnette 98
FIGURE 38: Poste d'échantillonnage: toiture 98
FIGURE 39: Particules en suspension: évolution des moyennes géométriques annuelles entre 1975 et 1984 pour quelques postes d'échantillonnage au Québec 100-101
FIGURE 40: Plomb: évolution des concentrations moyennes annuelles entre 1975 et 1984 pour quelques postes d'échantillonnage de la région de Montréal 99
FIGURE 41: Monoxyde de carbone: évolution des concentrations moyennes entre 1975 et 1984 pour quelques postes d'échantillonnage de la région de Montréal 102
FIGURE 42: Dioxyde de soufre: évolution des concentrations moyennes annuelles entre 1975 et 1984 pour quelques postes d'échantillonnage au Québec 103
FIGURE 43: Moyenne pondérée du pH des précipitations (1982-1983) 105
FIGURE 44: Dépôts annuels humides de sulfates (1982-1983) 105
FIGURE 45: Dépôts annuels humides de nitrates (1982-1983) 105

INTRODUCTION

L'air, ce mélange gazeux incolore, inodore et mobile, est gratuit et en abondance diront certains; pourquoi s'en soucier? Pourtant, nous inspirons et expirons près de 14 kilogrammes d'air par jour pour nous maintenir en vie, alors que nous n'absorbons qu'environ 1,4 kilogramme de nourriture et environ deux kilogrammes d'eau. Il est donc essentiel que l'on se préoccupe de la qualité de l'atmosphère.

Dans notre société industrielle, l'augmentation des émissions atmosphériques dues aux sources de combustion (chauffage domestique, centrales thermiques, incinération des ordures ménagères...) et aux autres activités humaines (industries, transport, agriculture...) a engendré un accroissement considérable des émissions de contaminants atmosphériques. Une grande partie du problème de la pollution atmosphérique est liée à la concentration des activités polluantes sur des espaces géographiquement restreints. Déjà, en 61 avant J.-C., Sénèque, le philosophe, se plaint de l'air irrespirable de Rome. La mauvaise qualité de l'air décrite par cet auteur était causée par la très grande densité de foyers domestiques utilisés pour la cuisson des aliments. On peut imaginer l'ampleur de ce problème en sachant qu'à cette époque, la population de Rome atteignait un million d'habitants, entassés pour la plupart dans des immeubles de plusieurs étages.

En Angleterre, l'usage du charbon comme combustible remonte au IX^{e} siècle. On constate très tôt que les fumées émises par ce combustible sont nocives. Au début du XIV^{e} siècle, l'air de Londres est tellement insupportable que Édouard 1er, un environnementaliste de la première heure, bannit l'emploi du charbon comme combustible pour les fournaises londonniennes. C'est en 1377 que la hauteur des cheminées est reconnue comme un facteur d'importance dans la dispersion des fumées.

Au XVI^{e} siècle, la combustion du charbon devient toutefois une nécessité à cause de la disparition d'une grande partie des forêts anglaises. Par la suite, la Révolution industrielle, en Angleterre comme ailleurs dans le monde, ne fut accompagnée d'aucune mesure visant à limiter efficacement la pollution atmosphérique. En 1873, commence à Londres une série de graves épisodes de pollution.

Après la Première Guerre mondiale, la menace de l'utilisation de gaz toxiques à des fins militaires a grandement incité les scientifiques à s'intéresser aux processus de diffusion atmosphérique. Les réglementations, quoique timides, ont une portée de plus en plus étendue. Toutefois, de sévères épisodes de pollution surviennent dans plusieurs régions du monde. En 1930, un brouillard intense composé de plusieurs contaminants provoque dans la vallée de la Meuse un excédent de mortalité de 60 à 80 décès; à Donora (Pennsylvanie), en 1948, une vingtaine de décès sont attribués à un épisode de pollution; à Londres, en 1952, un taux excédentaire de 4000 décès est enregistré à la suite du pire épisode de pollution atmosphérique rapporté à ce jour. Trois ans plus tard, 1000 décès sont imputés aux concentrations élevées de dioxyde de soufre et de particules en suspension survenues au cours d'un autre épisode de pollution.

Après la Seconde Guerre mondiale, l'évolution rapide des sciences comme l'ingénierie, la météorologie, la chimie, la physique, les sciences de la santé, l'informatique et même les sciences humaines a donné une impulsion irrésistible à l'ensemble des aspects liés aux problèmes de la pollution de l'air.

Les recherches actuelles dans le domaine de la pollution de l'air améliorent sans cesse notre connaissance des contaminants, de leurs effets, des processus atmosphériques régissant leur transport et leur transformation. Les résultats de ces recherches de même qu'une plus grande prise de conscience des problèmes liés à la pollution atmosphérique de la part des populations et de leurs gouvernements nous permettent d'espérer, pour l'avenir, une meilleure gestion du milieu atmosphérique.

L'objectif de cet ouvrage est de faire connaître dans un langage accessible[1] le vaste domaine souvent méconnu de la pollution atmosphérique. L'information fournie y a été vulgarisée et structurée afin de s'adapter dans la mesure du possible à la réalité québécoise. Cette publication s'adresse d'abord aux étudiants et professeurs des programmes d'études en environnement dans les cégeps et les universités. Il s'adresse aussi à toute personne intéressée de près ou de loin aux problèmes liés à la pollution atmosphérique.

Ce document présente quelques notions de base concernant la structure et la composition de l'atmosphère, décrit les caractéristiques des principaux contaminants atmosphériques, explique le cycle de la pollution atmosphérique, soit l'émission, la diffusion et le transport, et les mécanismes d'élimination des contaminants. Il traite aussi des effets des contaminants atmosphériques sur la santé, les animaux, la végétation et le milieu atmosphérique. Un chapitre est consacré aux méthodes de prévention de la pollution atmosphérique, tandis qu'un autre aborde la gestion de la qualité de l'atmosphère. Le dernier chapitre est consacré à la situation de la pollution atmosphérique au Québec. Le lecteur trouvera également en annexe la formulation d'un modèle très connu de dispersion des contaminants atmosphériques ainsi que les principales normes en vigueur au Québec touchant la qualité de l'atmosphère.

1. Les principaux termes techniques et particuliers utilisés dans le texte ont été regroupés dans le lexique apparaissant à la fin de l'ouvrage.

CHAPITRE 1

L'ATMOSPHÈRE: quelques notions de base

1. L'atmosphère: quelques notions de base

La terre est entourée de quelque 5,2 × 10^{19} tonnes d'air. Plus de la moitié de cette masse est contenue dans les premiers cinq à six kilomètres. Cette couche d'air est donc très mince en regard des 12 800 kilomètres du diamètre terrestre. De façon générale, nous définissons l'atmosphère comme étant l'air qui entoure la terre, à l'exclusion de l'air qui se trouve à l'intérieur d'une construction ou d'un espace souterrain.

1.1 La structure de l'atmosphère

L'atmosphère peut être subdivisée en diverses régions selon que l'on considère la composition moléculaire de l'air ou la variation de la température. La subdivision la plus couramment utilisée est faite en fonction des variations de la température de l'atmosphère que l'on observe avec l'altitude (figure 1). Cette classification nous permettra de mieux décrire subséquemment les mécanismes qui régissent la dispersion des contaminants atmosphériques.

La couche atmosphérique la plus près de la terre s'appelle la troposphère. On y observe en général une décroissance de la température avec l'altitude de l'ordre de 6,5 °C à 10 °C par kilomètre selon que l'air est saturé ou non saturé d'humidité. Cette décroissance de la température est due à la baisse de pression atmosphérique.

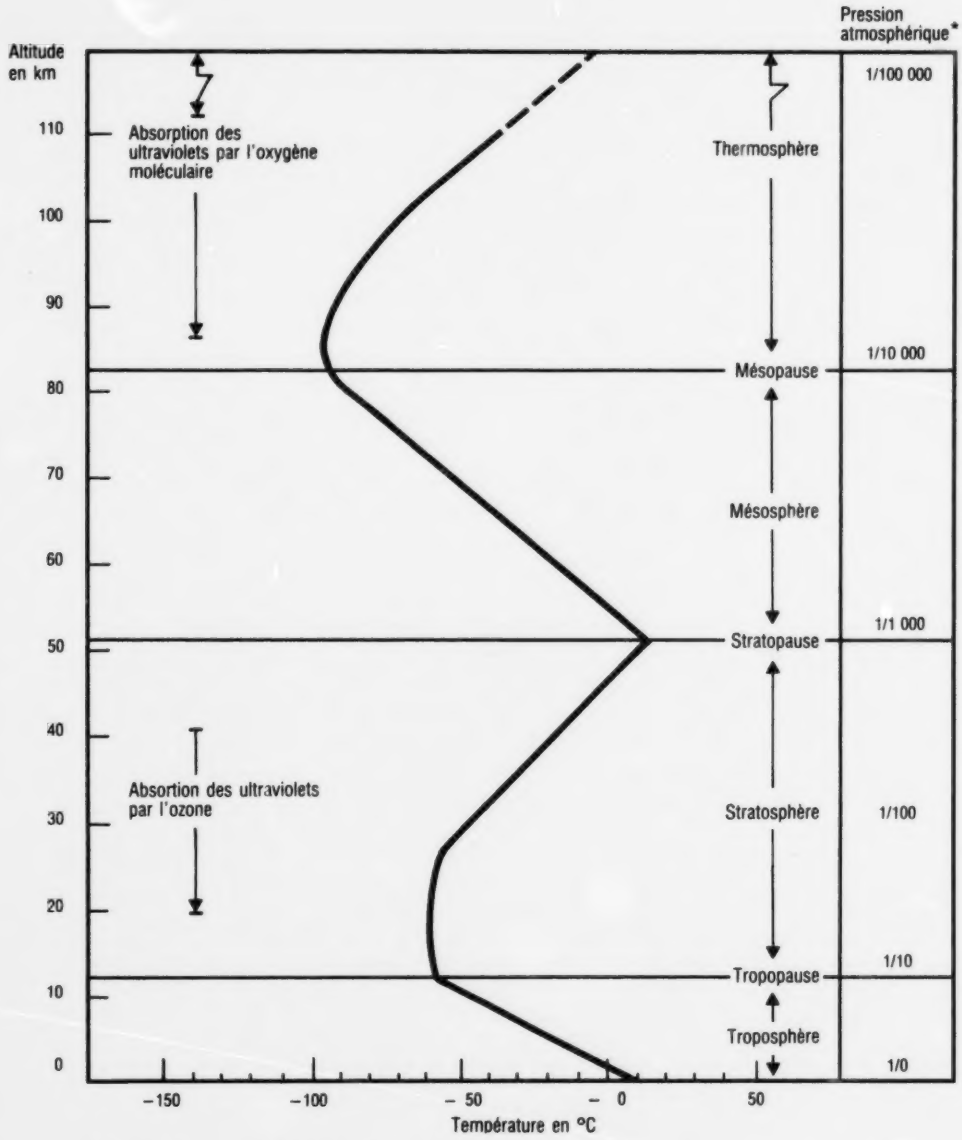
À la limite supérieure de la troposphère, les températures cessent de décroître, c'est la tropopause. L'épaisseur moyenne de la troposphère est d'environ 12 kilomètres. Elle varie en fonction de la latitude et de la saison de l'année; la tropopause la plus haute se situe au-dessus de l'équateur pendant l'été (18 km environ), tandis que la plus basse se situe dans les régions nordiques en hiver (8 km). La partie inférieure de la troposphère est généralement appelée couche limite. On peut définir la couche limite comme étant la partie de l'atmosphère fortement influencée par l'air qui s'est trouvé en contact avec la surface terrestre, durant un jour environ. Plus haute en été qu'en hiver, c'est dans cette petite section de la troposphère d'une hauteur moyenne d'un kilomètre que sont émis, se dispersent, réagissent et sont transportés les contaminants atmosphériques.

La stratosphère s'étend de la tropopause jusqu'à environ 50 kilomètres au-dessus du niveau de la mer. L'air y est énormément plus raréfié. Après s'être stabilisée sur une dizaine de kilomètres, la température augmente progressivement jusqu'à sa limite supérieure, la stratopause.

La stratosphère doit son existence à la couche d'ozone qui absorbe les rayons ultraviolets du soleil, ce qui permet à la stratosphère de se réchauffer jusqu'à la stratopause. À cette altitude, soit environ 50 kilomètres, la raréfaction de l'air et l'abondance relative de composés destructeurs d'ozone ne permettent plus le réchauffement de l'atmosphère. La couche d'ozone stratosphérique constitue une protection contre les rayons ultraviolets.

La mésosphère s'étend au-delà de la stratopause jusqu'à la mésopause (80 km). La décroissance de la température reprend en raison de la baisse de pression.

Au-delà de 80 kilomètres, la température augmente à nouveau dans la thermosphère à cause de l'absorption par l'oxygène moléculaire d'une partie des rayons ultraviolets.



* Fraction de la valeur observée au niveau de la mer

FIGURE 1 — **Profil vertical de la température dans l'atmosphère et nomenclature de ses subdivisions**

1.2 *La composition de l'air*

L'air que l'on retrouve dans l'atmosphère est composé en volume d'environ 78 pour cent d'azote, 21 pour cent d'oxygène et un pour cent d'autres gaz. Le tableau 1 donne la proportion des divers gaz qui composent l'air sec.

La quantité de vapeur d'eau que l'on retrouve dans la troposphère varie de zéro pour cent à trois pour cent (en volume) selon que l'on se situe dans une région aride ou une région chaude et humide. La vapeur d'eau joue un rôle important dans la formation des nuages, les précipitations, le bilan thermique de la terre et les réactions chimiques qui ont lieu dans l'atmosphère.

L'atmosphère contient également des aérosols qui se composent de particules liquides et solides en suspension. Ces particules peuvent être viables, comme les pollens, les bactéries, les champignons, les spores, les insectes, ou non viables, comme le sable fin et les autres poussières de sol, les poussières volcaniques, les embruns marins, les particules atmosphériques générées sous l'action du rayonnement, de la chaleur et de l'humidité.

La composition de l'air ne semble pas avoir beaucoup changé depuis 20 millions d'années. Cependant, dans une société industrielle avancée, les concentrations de certains constituants naturels de l'air peuvent être grandement modifiées. De plus, des corps étrangers, voire même toxiques, peuvent être ajoutés abondamment à l'air. La nature et l'origine des contaminants atmosphériques sont brièvement décrites dans le chapitre qui suit. Nous verrons, notamment, que ces contaminants peuvent être émis par des phénomènes naturels ou à la suite d'activités humaines.

TABLEAU 1 — **Composition de l'air sec (en proportion relative)**

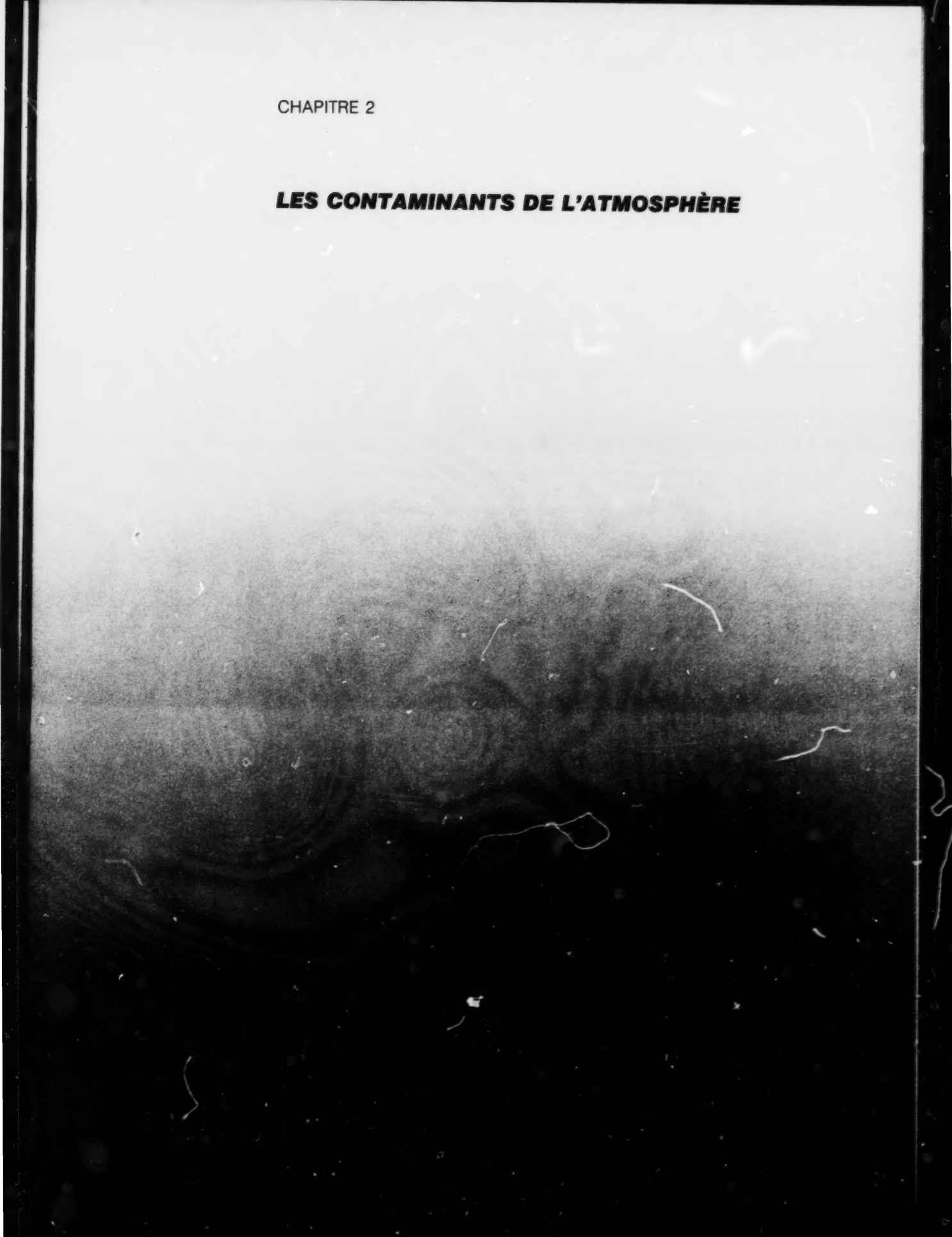
GAZ		POURCENTAGE D'UN VOLUME D'AIR SEC
Azote	(N_2)	78,09
Oxygène	(O_2)	20,95
Argon	(Ar)	0,93
Dioxyde de carbone	(CO_2)	0,0344 ou (344 ppm)
Néon	(Ne)	0,0018 ou (18 ppm)
Hélium	(He)	0,0005 ou (5 ppm)
Krypton	(Kr)	0,0001 ou (1 ppm)
Hydrogène	(H_2O)	0,00005 ou (0,5 ppm) ou (5 ppb)
Xénon	(Xe)	0,000008 ou (0,08 ppm) ou (80 ppb)
Ozone	(O_3)	0,000002 ou (0,02 ppm) ou (20 ppb)

D'après P. Urone, 1976, dans AIR POLLUTION (édité par A.C. Stern).

ppm: partie par million
ppb: partie par milliard

CHAPITRE 2

LES CONTAMINANTS DE L'ATMOSPHÈRE



2. Les contaminants de l'atmosphère

Les contaminants atmosphériques peuvent être des matières solides, liquides ou gazeuses, des micro-organismes, une odeur, un rayonnement, une chaleur, une radiation ou toute combinaison des uns et des autres susceptibles d'altérer de quelque manière la qualité de l'environnement. Cette définition est tirée de la loi québécoise sur la qualité de l'environnement.

La plupart des nombreuses définitions de la pollution atmosphérique ont généralement en commun l'idée d'un seuil à partir duquel les contaminants atmosphériques sont susceptibles de créer des effets indésirables. Ainsi, la pollution atmosphérique est, selon la définition québécoise, l'état de l'atmosphère lorsque l'on y trouve un contaminant ou un mélange de contaminants en concentration ou en quantité supérieure à un seuil admissible. La définition suggérée en 1967 par la Commission du Conseil de l'Europe est particulièrement intéressante. Elle s'énonce comme suit: «Il y a pollution de l'air lorsque la présence d'une substance étrangère ou une variation importante dans les proportions de ses composantes est susceptible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment, de provoquer un effet nocif ou de créer une nuisance ou une gêne».

L'atmosphère polluée est souvent associée aux diverses activités humaines, qu'elles soient industrielles ou domestiques. Pourtant, plusieurs contaminants sont également émis dans l'atmosphère par des phénomènes naturels. Sur une base globale, certains de ces contaminants sont même émis en quantités plus importantes par la nature que par l'homme. La pollution atmosphérique cause toutefois les problèmes les plus sérieux dans les régions urbaines ou à proximité des grandes sources ponctuelles d'émission.

On classe les contaminants atmosphériques en deux groupes: les contaminants primaires et les contaminants secondaires. Les contaminants primaires sont émis directement à l'atmosphère sous forme particulaire ou gazeuse. Ils peuvent causer par eux-mêmes des effets indésirables sur un ou plusieurs milieux récepteurs. Les contaminants secondaires sont des composés, particulaires ou gazeux, qui découlent de réactions chimiques ou photochimiques entre certains contaminants primaires ou entre certains contaminants primaires et les constituants normaux de l'atmosphère.

2.1 *Les matières particulaires*

Elles comprennent des particules viables comme des pollens, des micro-organismes (algues, protozoaires, spores, bactéries, virus...) et des insectes. Elles regroupent aussi des particules non viables solides ou liquides, comme des composés inorganiques (minéraux, métaux, embruns...) et des composés organiques synthétiques (produits de combustion, herbicides, pesticides...).

La taille de ces particules varie généralement entre 0,001 micromètre (μm et un millimètre (mm). Les particules plus petites que quelques micromètres sont celles qui peuvent pénétrer le plus profondément dans le système respiratoire et atteindre les poumons, car les particules plus grandes que dix micromètres sont filtrées par le nez et la bouche. La figure 2 montre le diamètre de divers types de particules.

Les particules ont aussi la propriété de pouvoir retenir par adsorption des contaminants gazeux comme les dioxines, les furannes et les hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA). Ces contaminants, générés par les procédés de combustion, sont reconnus comme des composés très toxiques.

Le tableau 2 donne une estimation des émissions atmosphériques de matières particulaires à l'échelle planétaire. Ce tableau fait ressortir la part prépondérante (plus de 80 pour cent) des émissions naturelles dans la charge particulaire de la troposphère. Notons, parmi les sources naturelles primaires, les embruns marins, les poussières soulevées par le vent. Les sources naturelles secondaires regroupent principalement les particules formées à partir des oxydes de soufre (sulfates), des oxydes d'azote (nitrates) et des composés organiques volatils exhalés par la végétation (hydrocarbures).

Les particules d'origine anthropique provenant de sources ponctuelles sont émises surtout par les activités industrielles et la combustion dans les sources fixes (contaminants primaires). Les sulfates et les nitrates (contaminants secondaires) représentent aussi une fraction importante des émissions dues à l'homme. Ces composés particulaires se forment à partir des oxydes de soufre et des oxydes d'azote, à la suite de réactions chimiques complexes ayant lieu dans l'atmosphère, et participent à la problématique des précipitations acides.

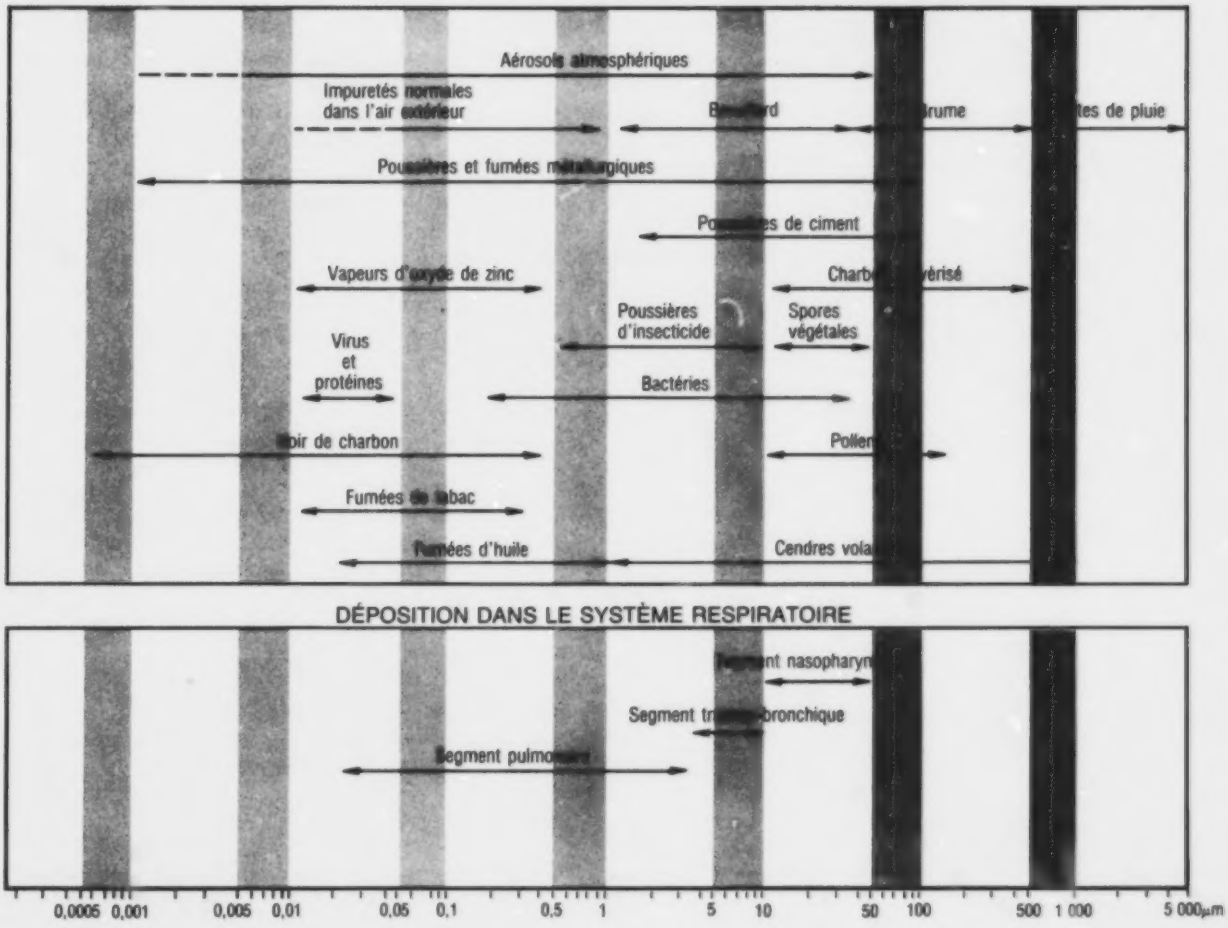


FIGURE 2 — **Diamètre de divers types de particules atmosphériques**

TABLEAU 2 — **Estimation des émissions mondiales annuelles de matières particulaires dans la troposphère (en millions de tonnes)**

		PARTICULES DE TOUTES TAILLES *(pourcentage des émissions totales)*	PARTICULES PLUS PETITES QUE 5μm *(pourcentage des émissions totales)*
SOURCES NATURELLES			
Primaires	Embruns marins	1000	500
	Poussières soulevées par le vent	500	250
	Éruptions volcaniques	—	25
	Débris météoritiques	10	—
	Feux de forêts	25	5
	Total	1535 *(61)*	780 *(51)*
Secondaires	Sulfates	420	335
	Nitrates	75	60
	Hydrocarbures	75	75
	Total	570 *(23)*	470 *(31)*
SOURCES ANTHROPIQUES			
Primaires	Processus industriels	56,4	12,4
	Sources fixes de combustion	43,4	9,6
	Incinération de déchets solides	2,4	0,4
	Transport	2,2	1,8
	Divers	28,8	5,4
	Total	133,2 *(5)*	29,6 *(2)*
Secondaires	Sulfates	220	200
	Nitrates	40	35
	Hydrocarbures	15	15
	Total	275 *(11)*	250 *(16)*
	Sources naturelles totales	**2105 *(84)***	**1250 *(82)***
	Sources anthropiques totales	**408 *(16)***	**280 *(18)***
	Émissions totales	**2513 *(100)***	**1530 *(100)***

D'après J.T. Peterson et C.E. Junge, 1971.

2.2 *Les contaminants gazeux*

Les contaminants gazeux sont rejetés en quantités gigantesques dans l'atmosphère. À l'exception du dioxyde de soufre, ils sont émis en plus grande quantité par des sources d'émissions naturelles, surtout les processus biologiques comme la décomposition anaérobique, la décomposition des matières organiques, l'action bactérienne dans le sol et l'oxydation par les végétaux et les animaux des substances contenant du carbone. Les principales sources anthropiques sont la combustion, les transports et les procédés industriels. Le tableau 3 donne les chiffres d'émissions mondiales pour divers contaminants gazeux selon les sources naturelles et anthropiques.

TABLEAU 3 — **Estimation des émissions mondiales annuelles des principaux contaminants gazeux (en millions de tonnes)**

	SOURCES NATURELLES	ÉMISSIONS (x 10^6 t)	SOURCES ANTHROPIQUES	ÉMISSIONS (x 10^6 t)
Dioxyde de soufre (SO_2)	Activité volcanique	0,2 à 0,4	Combustion dans des sources fixes, industries	132
Hydrogène sulfuré (H_2S)	Décomposition biologique anaérobique, activité volcanique	91	Industries	2,7
Monoxyde de carbone (CO)	Oxydation photochimique du méthane, décomposition de la chlorophylle, volcans, feux de forêts	30	Transport, industries combustion dans des sources fixes	276
Oxydes d'azote (NO_x)	Action bactérienne dans le sol	990	Transport, combustion dans des sources fixes	48
Hydrocarbures	Processus biologiques	Méthane 1 450 Terpènes 180	Transport, industries	80
Dioxyde de carbone (CO_2)	Oxydation par les végétaux et les animaux des substances contenant du carbone, décomposition des matières organiques	910 000	Combustion	13 000

D'après E.R. Robinson et R.C. Robbins, 1972, dans AIR POLLUTION CONTROL (édité par W. Strauss).

2.2.1 *Les composés du soufre*

Le dioxyde de soufre, appelé aussi bioxyde de soufre ou anhydride sulfureux (SO_2), est un gaz incolore à l'odeur très irritante. Au contact de l'atmosphère, il s'oxyde lentement en trioxyde de soufre (SO_3). Le taux de conversion est estimé à un pour cent par heure.

$$2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$$

En jouant un rôle de catalyseur, la présence de particules dans l'atmosphère, notamment celles contenant du fer et du manganèse, accélère la transformation du SO_2 en SO_3. Celui-ci est aussi émis comme contaminant primaire en même temps que le SO_2, dans une proportion variant de un à cinq pour cent de la concentration de ce dernier. Le SO_3 se combine rapidement avec l'eau pour former de l'acide sulfurique.

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

Ce type de réaction peut être à l'origine de brouillards acides du type londonnien. Les aérosols d'acide sulfurique sont également liés au problème des précipitations acides.

Les émissions de SO_2 sont dues en grande majorité à des activités humaines, surtout l'utilisation de combustibles fossiles contenant du soufre, comme le charbon et l'huile, ainsi que certaines productions industrielles, notamment l'extraction de métaux non ferreux et les usines de pâtes et papiers. Les sources d'émissions naturelles de SO_2 sont de faible importance (tableau 3).

L'hydrogène sulfuré (H_2S) est un gaz toxique dont la mauvaise odeur rappelle celle des œufs pourris. Il peut être détecté par l'odorat à des concentrations aussi faibles que 0,5 partie par milliard (ppb). Les principales sources anthropiques d'émission de H_2S sont les usines de pâtes et papiers utilisant le procédé kraft et les raffineries de pétrole. Les émissions naturelles dues à la décomposition biologique anaérobique dans le sol, les marais et les océans et au volcanisme sont toutefois beaucoup plus élevées que les émissions d'origine anthropique (tableau 3).

Des gaz tels que le sulfure de diméthyle (CH_3SCH_3), le disulfure de diméthyle (CH_3SSCH_3) et le méthyle mercaptan (CH_3SH) sont également des composés fortement odorants. Ils ont des odeurs comparables à celles des œufs pourris. Ces gaz sont émis surtout par les usines de pâtes et papiers qui utilisent le procédé kraft.

2.2.2 *Les oxydes d'azote*

Les oxydes d'azote sont nombreux. Cependant, en pollution de l'air, cette appellation désigne généralement le monoxyde d'azote et le dioxyde d'azote. Le monoxyde d'azote (NO) est un gaz inodore et incolore. La plupart des oxydes d'azote sont émis dans l'atmosphère sous cette forme. Le dioxyde d'azote (NO_2) est un gaz corrosif et brunâtre dont l'odeur est irritante. Il est formé principalement dans un air pollué par la transformation du monoxyde d'azote lorsque ce dernier entre en contact avec l'atmosphère.

$$NO + O_2 \longrightarrow NO_3$$
$$NO_3 + NO \longrightarrow 2NO_2$$

Les émissions d'oxydes d'azote proviennent des gaz d'échappement des véhicules de transport et de la combustion de combustibles fossiles dans des sources fixes.

L'action bactérienne dans le sol est un processus biologique qui émet des quantités importantes d'oxydes d'azote dans l'atmosphère (tableau 3).

2.2.3 *Les composés gazeux du carbone*

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz asphyxiant, incolore et inodore, à peine plus léger que l'air. Il est le produit d'une combustion incomplète des matières organiques.

Les émissions anthropiques de monoxyde de carbone proviennent en grande majorité de la combustion des produits pétroliers et du charbon. À ce chapitre, les véhicules automobiles constituent la principale source d'émission.

La nature émet des quantités considérables de CO. Les sources principales sont l'oxydation photochimique du méthane, la décomposition de la chlorophylle, les volcans et les feux de forêt (tableau 3).

Le dioxyde de carbone (CO_2) n'est pas un contaminant comme les autres puisqu'il joue un rôle essentiel pour la vie terrestre. Environ un billion (10^{12}) de tonnes de CO_2 participent annuellement au cycle du carbone. Absorbé par la végétation, il est transformé par photosynthèse en hydrates de carbone qui circulent à travers les chaînes alimentaires. Ces carbones retournent à l'atmosphère par la respiration et la décomposition des matières organiques.

Au XIX^e siècle, on estimait la concentration de fond de CO_2 à 290 parties par million (ppm). Aujourd'hui, cette concentration est évaluée à 344 ppm. La majeure partie de cette augmentation résulte de la croissance mondiale de la combustion du

charbon et des produits pétroliers. Les émissions d'origine anthropique sont de l'ordre de la dizaine de milliards de tonnes (tableau 3). Certains chercheurs croient que la concentration de CO_2 pourrait atteindre 450 ppm vers 2025 et 600 ppm vers 2050.

La plupart des rayons infrarouges émis par la terre sont absorbés par le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau présents dans l'atmosphère. Une partie importante de ces rayonnements est restituée à la surface terrestre. Ce phénomène est souvent appelé «effet de serre». Nous verrons au chapitre 4 que l'augmentation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère pourrait, en accentuant l'effet de serre, provoquer d'importants changements climatiques.

Les hydrocarbures regroupent une multitude de composés organiques constitués essentiellement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Les émissions anthropiques d'hydrocarbures sont causées principalement par l'utilisation de carburant dans les véhicules à moteur. La production, l'entreposage et la manipulation des produits pétroliers et des solvants sont aussi des sources d'émissions appréciables. Les hydrocarbures jouent un rôle prépondérant dans la formation de contaminants secondaires que l'on appelle les oxydants.

Divers processus biologiques (terpènes produits par la végétation, méthane provenant de la décomposition organique) libèrent de grandes quantités d'hydrocarbures dans l'atmosphère (tableau 3).

Les hydrocarbures dérivés sont des composés organiques dont certains atomes d'hydrogène sont remplacés par de l'oxygène, de l'azote, du chlore ou d'autres constituants. Ils proviennent notamment de l'utilisation des solvants organiques dans l'industrie chimique, de la combustion de produits pétroliers et de l'incinération. Les aldéhydes, les biphényls polychorés, les dioxines et les furannes sont notamment des hydrocarbures dérivés.

2.2.4 *Autres contaminants primaires*

Les fluorures se présentent soit sous une forme gazeuse (surtout sous forme de HF), soit sous une forme particulaire (CaF_2). Les fluorures existent dans l'air non contaminé. Toutefois, on retrouve les plus fortes concentrations atmosphériques à proximité des usines d'électrolyse de l'aluminium, des usines d'engrais phosphatés, des usines de verre et de céramique, des usines de phosphore.

Le chlore (Cl_2) est un constituant normal de l'atmosphère résultant d'une décomposition photochimique du chlorure de sodium (NaCl) contenu dans les embruns marins. La concentration naturelle de ce gaz est cependant très faible. Les fortes concentrations de chlore que l'on peut observer occasionnellement dans l'atmosphère résultent, la plupart du temps, d'accidents qui se produisent dans les industries ou au cours de son transport. Ainsi en novembre 1979, des dizaines de milliers d'habitants de Mississauga (Ontario) durent être évacués à la suite du déraillement d'un train transportant plusieurs wagons de chlore.

L'acide chlorhydrique (HCl) peut également être émis accidentellement par les usines productrices ou utilisatrices. L'incinération des déchets domestiques est une source non négligeable de ce contaminant qui résulte de la combustion de matériaux à base de chlorure de polyvinyle.

Le mercure émis sous forme inorganique, tant par la nature que par l'activité humaine (fonderies de métaux non ferreux, fabriques de chlore et de soude caustique, combustion de combustibles fossiles), ne présente pas de danger pour la santé publique, sauf à de fortes concentrations que l'on retrouve parfois en milieu de travail. La forme organique de ce contaminant (méthyl et diméthyl-mercure) pose beaucoup plus de problèmes. Elle résulte de la transformation du mercure inorganique par des bactéries. Les humains peuvent être intoxiqués par la chaîne alimentaire, surtout en consommant du poisson contaminé.

2.2.5 *L'ozone*

L'ozone (O_3) est un constituant normal de l'atmosphère. Il se forme dans la stratosphère à la suite de la réaction des molécules d'oxygène avec les atomes d'oxygène produits par l'action des rayons ultraviolets sur les molécules d'oxygène.

$$O_2 \rightarrow O + O$$
$$O + O_2 \rightarrow O_3$$

La couche de l'atmosphère compris entre 20 et 40 kilomètres constitue donc une région riche en ozone qui filtre les rayons solaires dans l'ultraviolet. On croit aujourd'hui que seulement une très petite quantité d'ozone pénètre dans les couches inférieures de la troposphère à la suite de certaines conditions météorologiques. En effet, l'ozone retrouvé dans les basses couches de l'atmosphère est le résultat de réactions photochimiques sur les oxydes d'azote où interviennent les hydrocarbures.

L'absorption des rayons solaires (λ) par le NO_2 génère de l'oxygène atomique.

$$NO_2 \xrightarrow{(\lambda)} NO + O$$

L'oxygène atomique (O) réagit avec l'oxygène moléculaire pour produire de l'ozone (O_3).

$$O_2 + O \rightarrow O_3$$

Celui-ci réagit rapidement avec NO pour recréer NO_2.

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$

Un équilibre dynamique s'établit alors entre NO_2 et O_3.

$$NO_2 + O_2 \rightleftharpoons NO + O_3$$

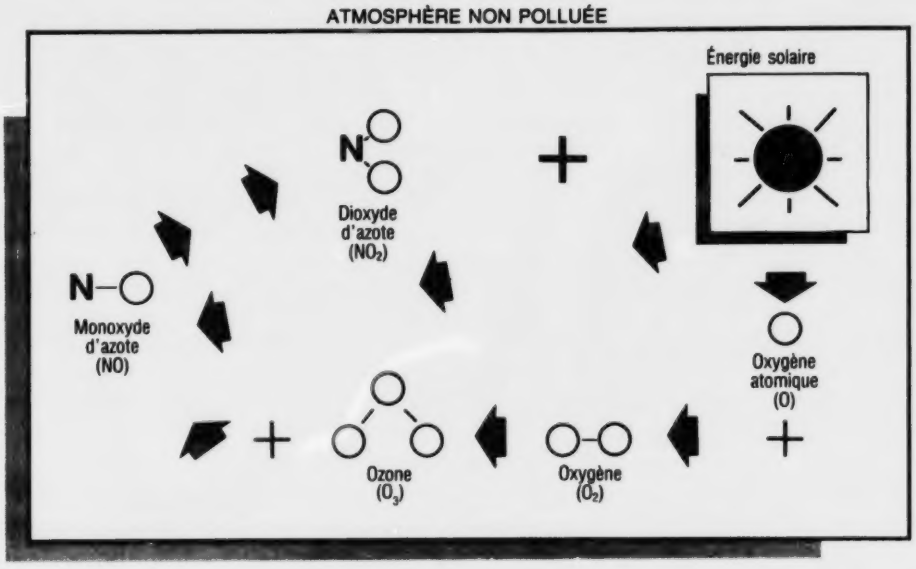
La formation d'un brouillard photochimique comme on peut souvent l'observer à Los Angeles est due à la présence de concentrations importantes d'hydrocarbures qui, oxydés par l'oxygène atomique, réagissent avec le NO pour former du NO_2. L'équilibre étant rompu, il s'ensuit une augmentation des concentrations d'ozone. Les réactions photochimiques des hydrocarbures avec les oxydes d'azote entraînent également la formation de divers composés. On retrouve parmi ceux-ci les nitrates de péroxyacyle (PAN). L'ozone, le dioxyde d'azote et les nitrates de péroxyacyle sont parmi les plus importants composés désignés sous le terme d'oxydants.

La figure 3 illustre l'interaction des divers contaminants et conditions requises à la formation d'un brouillard photochimique.

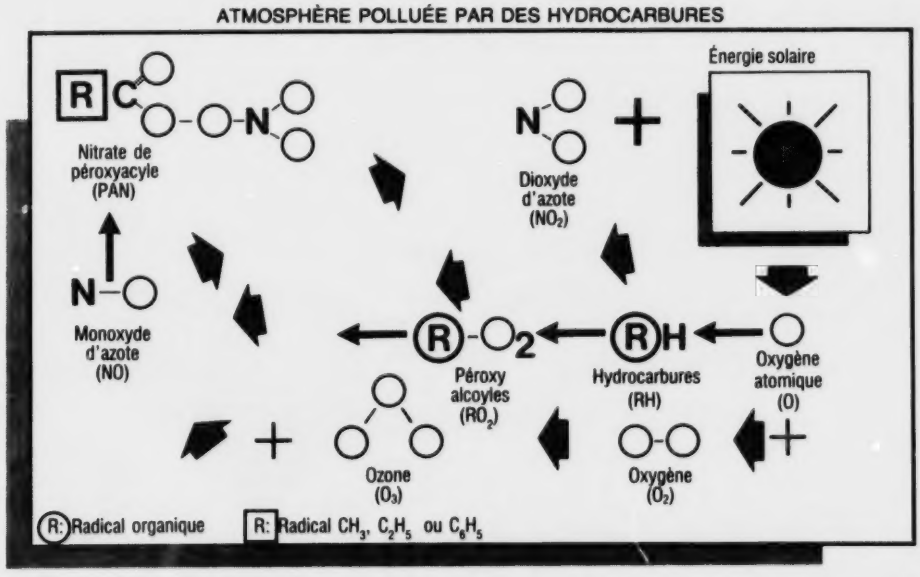
2.2.6 *Les contaminants radioactifs*

Les contaminants radioactifs, outre les sources naturelles, peuvent être émis par les explosions nucléaires, les centrales atomiques ou les activités minières reliées à l'extraction de minerai radioactif. Des produits de consommation, comme les détecteurs de fumée, les dispositifs antistatiques, les pièces luminescentes d'horlogerie sont également des sources mineures de radiations. Les irradiations de nature médicale constituent cependant les principales sources d'exposition d'origine anthropique.

Lors d'une explosion nucléaire en haute altitude ou de forte intensité, des éléments radioactifs, des radiations, des neutrons et des oxydes d'azote peuvent atteindre la stratosphère où ils peuvent demeurer pendant des mois. Les centrales nucléaires



État d'équilibre



Rupture d'équilibre due à la présence des hydrocarbures. Il en résulte une augmentation de l'ozone et la formation des nitrates de péroxyacyle.

FIGURE 3 — **Interaction des contaminants responsables de la formation de brouillards photochimiques**

peuvent aussi rejeter accidentellement des produits radioactifs tels des isotopes de krypton (^{85}Kr), de strontium (^{90}Sr), d'iode (^{131}I), de césium (^{137}Cs) et de radium (^{226}Ra). L'exploitation de mines d'uranium et de niobium engendre également des émissions locales de contaminants radioactifs.

Les émissions naturelles de radioactivité peuvent être d'origine terrestre, le sol et la roche contenant des proportions variables de minéraux radioactifs tel le radium (^{226}Ra), ou produites par l'interaction des rayons cosmiques sur les gaz atmosphériques comme dans le cas du tritium (^{3}H). Des émissions notables de gaz radioactifs, comme le radon (^{222}Rn), proviennent de la désagrégation du radium (^{226}Ra).

2.2.7 *Les odeurs*

Les odeurs constituent une des principales sources des plaintes formulées auprès des agences de contrôle de la qualité de l'air. Ces plaintes ne concernent pas uniquement des odeurs provenant d'usines d'équarrissage des animaux, de raffineries de pétrole, d'usines chimiques, d'usines de pâtes et papiers, de gaz d'échappement des véhicules automobiles ou même de la combustion du bois à des fins résidentielles. Elles concernent aussi des usines de torréfaction de café et des boulangeries qui, bien que les odeurs qui en émanent puissent être très agréables occasionnellement, n'en sont pas moins désagréables pour les citoyens qui ont à les subir constamment.

Dans les régions rurales, les fermes de production animale (production laitière, production de bovins, de porcs, d'ovins, de volailles) sont très souvent à l'origine de plaintes émises par la population environnante.

Les odeurs peuvent être perçues de façon très différente selon que les personnes y sont exposées de façon habituelle ou occasionnelle. Ainsi, il arrive fréquemment que les travailleurs œuvrant dans des milieux nauséabonds (où prédominent par exemple les odeurs de lisier de porc ou de mercaptan) et que les citoyens demeurant dans un secteur industriel ne perçoivent plus ces émanations à cause d'un phénomène d'accoutumance. Au contraire, les personnes soumises à des odeurs inhabituelles y sont généralement beaucoup plus réceptives. De la même manière, des augmentations subites de l'intensité des odeurs sont plus facilement perceptibles par les observateurs qui y sont habitués.

Les odeurs peuvent être décrites par rapport à trois aspects distincts: leur nature, la sensation qu'elles provoquent et leur intensité. Il est cependant difficile de définir une odeur du fait qu'elle s'apparente, aux dires des spécialistes, à un objet inscrit dans un espace à plusieurs dimensions. De plus, à cause de leur éducation et de leurs expériences olfactives différentes, les individus réagissent différemment à une odeur, ce qui explique par exemple que l'odeur de l'étable et de la porcherie n'est pas perçue de la même façon par l'exploitant agricole et le citadin. Finalement, l'intensité dépend pour une même odeur de la concentration du composé odorant dans l'atmosphère. Le seuil de perception varie considérablement d'une substance à une autre.

CHAPITRE 3

LE CYCLE DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

3. *Le cycle de la pollution atmosphérique*

Si la pollution atmosphérique est au départ un problème local, le mélange graduel des contaminants à des volumes d'air toujours de plus en plus grands résulte en une distribution de ces contaminants à l'ensemble du milieu atmosphérique terrestre. On a cru longtemps que les contaminants émis dans l'atmosphère finissaient par disparaître. À l'échelle du globe, la capacité de diffusion de l'atmosphère est immense mais elle n'est pas sans limite. L'augmentation de la concentration de fond du dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre en est un bon exemple.

Ainsi le domaine spatial de la pollution atmosphérique s'étend d'une très petite échelle (quelques mètres) à une très grande échelle (celle de la planète). Le tableau 4 donne quelques exemples d'environnements géographiques où peuvent s'observer des problèmes de pollution atmosphérique en fonction des échelles spatiales.

TABLEAU 4 — **Environnements géographiques et échelles spatiales de représentativité**

ÉCHELLES SPATIALES DE REPRÉSENTATIVITÉ	DIMENSIONS SPATIALES	ESPACES GÉOGRAPHIQUES ET PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS
Micro-échelle	**quelques mètres à 100 m**	• **intersections et corridors urbains** • **terrains de stationnement** • **environs immédiats des sources d'émission** • **artères urbaines**
Locale	100 m à 500 m	• proximité des sources • autoroutes et boulevards
Quartier	**500 m à 5 km**	• **petits quartiers urbains** • **villages** • **grands quartiers urbains** • **petites villes**
Urbaine ou régionale	5 km à 100 km	• villes • grandes métropoles • zones rurales
Continentale	**100 km à 5000 km**	• **transport des contaminants à grande distance** • **problèmes de pollution transfrontalière**
Mondiale ou planétaire	5000 km	• éruptions volcaniques et explosions nucléaires projetant des particules dans la haute atmosphère

Quelle que soit l'échelle spatiale considérée, le cycle de la pollution atmosphérique peut être subdivisé en trois grandes étapes fondamentales: l'émission des contaminants, leur diffusion et leur transport, leur élimination et leur dépôt sur les milieux récepteurs (figure 4). Dans ce chapitre, nous examinerons brièvement chacune des étapes qui déterminent ce cycle.

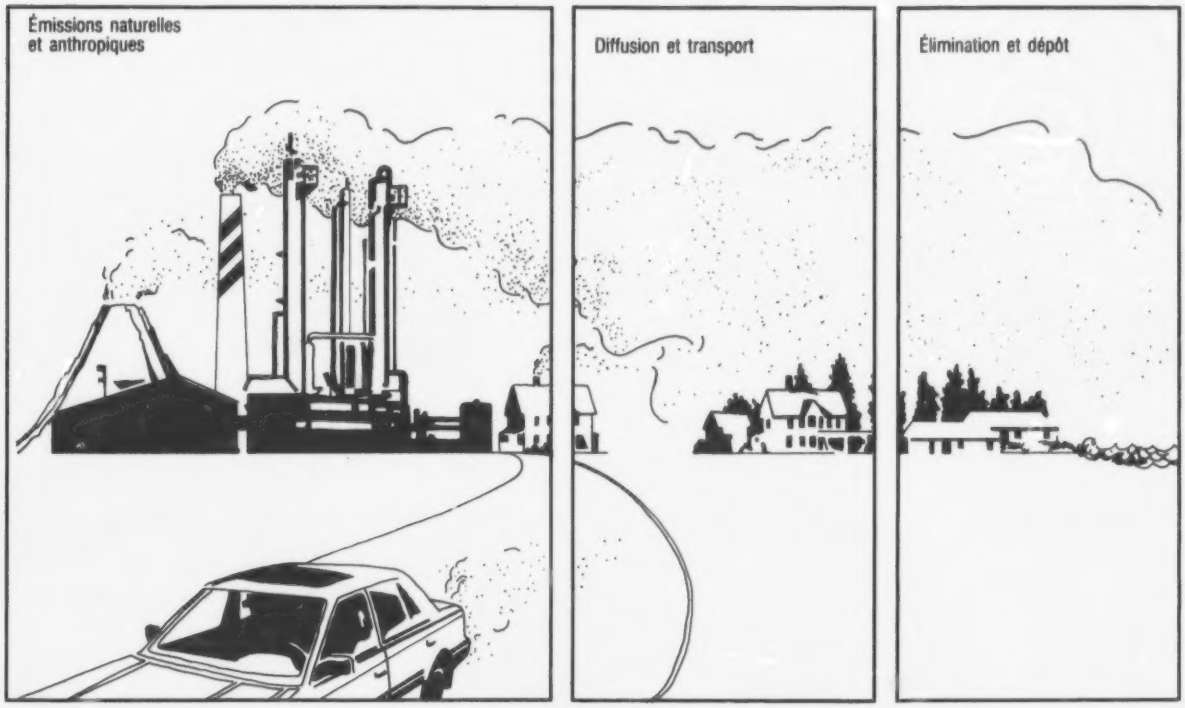


FIGURE 4 — **Le cycle de la pollution atmosphérique**

3.1 *L'émission des contaminants*

La variation spatiale des concentrations atmosphériques d'un contaminant est largement tributaire de la nature et de la distribution des sources d'émission. Ces sources d'émission peuvent être continues ou discontinues dans le temps. Le volume des sources ponctuelles d'émission, comme les cheminées d'usines, les évents de toit, les points de déchargement de matériel, varie surtout en fonction du volume de la production industrielle ou de la quantité de matières transformées. Les sources linéaires sont la plupart du temps identifiées aux routes et autoroutes. Leur intensité varie surtout en fonction de l'achalandage. Enfin, les sources diffuses sont très variables. Leur intensité varie en fonction de multiples facteurs: production (carrières, sablières, manutention de matériaux en vrac), saison (chauffage domestique d'une ville), achalandage (réseau routier urbain). Elles englobent également les sources naturelles émises à l'échelle planétaire (émissions de terpènes provenant de la végétation, émissions océaniques de sulfates et de nitrates, poussières soulevées par le vent).

Il est toutefois important de mentionner que le type de sources d'émission peut aussi se caractériser par rapport à l'environnement géographique utilisé comme point de référence. Ainsi, par exemple, une source diffuse d'émission, comme le chauffage domestique de toute une ville, peut être considérée comme une source ponctuelle à l'échelle continentale.

Les inventaires d'émissions constituent un aspect important de la connaissance de la problématique de la pollution atmosphérique. Les données sont calculées pour les principales sources en utilisant, soit des facteurs d'émission établis en fonction, par exemple, de la production, de la quantité de matières premières utilisées, de la distance parcourue ou de la consommation d'essence, soit en utilisant des bilans de matière. Ces inventaires peuvent être établis à toutes les échelles spatiales. Ils sont utiles pour l'élaboration des politiques d'assainissement, l'application et le suivi des réglementations, l'étude des effets des contaminants, la prévision de la qualité de l'atmosphère et la mise en place des réseaux d'échantillonnage.

3.2 *La diffusion et le transport des contaminants*

Dès leur émission, les contaminants sont diffusés et transportés dans l'atmosphère vers les récepteurs. La diffusion et le transport sont régis respectivement par la turbulence de l'air et par les vents. La turbulence consiste en des mouvements tourbillonnaires de l'air dont l'origine peut être thermique ou mécanique.

3.2.1 *La turbulence thermique*

Le gradient vertical de température que l'on associe à la turbulence d'origine thermique est un paramètre souvent utilisé comme indice du pouvoir dispersif de l'atmosphère. Le gradient vertical de température représente la variation de la température en fonction de l'altitude.

Lorsqu'une parcelle d'air monte, elle subit des pressions de plus en plus faibles, se dilate et sa température diminue. Lorsqu'elle descend, la particule se comprime à la suite de l'augmentation de la pression atmosphérique et, conséquemment, elle se réchauffe.

Rappelons que dans la troposphère, l'air sec se refroidit à un taux de 10 °C par kilomètre d'altitude (1 °C par 100 mètres). Cette décroissance est appelée gradient adiabatique sec. Dans ce cas, il n'y aurait aucun échange de température entre une parcelle d'air soumise à un déplacement vertical et le milieu atmosphérique environnant. Dans l'air saturé d'humidité, cette décroissance est de 6,5 °C par kilomètre d'altitude. On parle dans ce cas de gradient pseudo-adiabatique humide.

Les conditions réelles de variations de température avec l'altitude (mesurée avec des sondes appropriées) sont cependant très souvent différentes du gradient adiabatique. Ces différentes structures verticales de température sont importantes en pollution atmosphérique parce qu'elles affectent le pouvoir de diffusion des contaminants dans l'atmosphère.

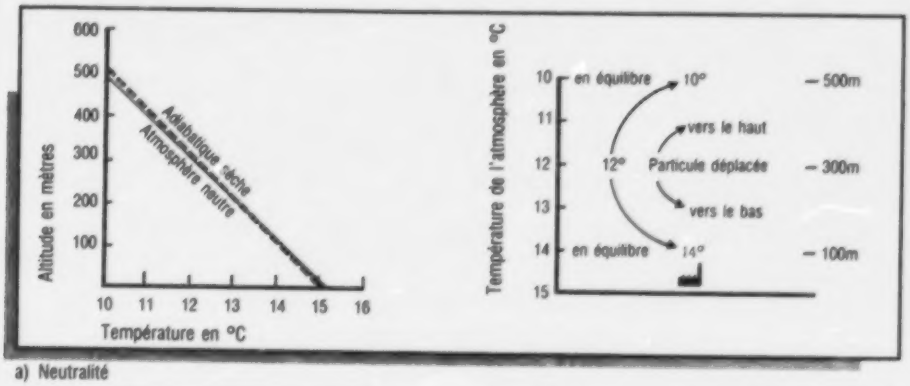
La comparaison entre ces structures verticales et le gradient adiabatique sec définit les trois conditions types de stabilité de l'atmosphère: neutralité, instabilité et stabilité. Examinons le comportement d'une parcelle d'air déplacée verticalement dans l'atmosphère selon ces conditions de stabilité.

Lorsque la décroissance verticale de la température réelle est très proche du gradient adiabatique sec (figure 5 a), on dit que l'atmosphère est neutre. Ainsi, lorsqu'une parcelle d'air est déplacée vers le haut ou vers le bas, elle a la même température que l'atmosphère environnante, donc la même densité. Conséquemment, elle n'aura pas tendance à accélérer son mouvement.

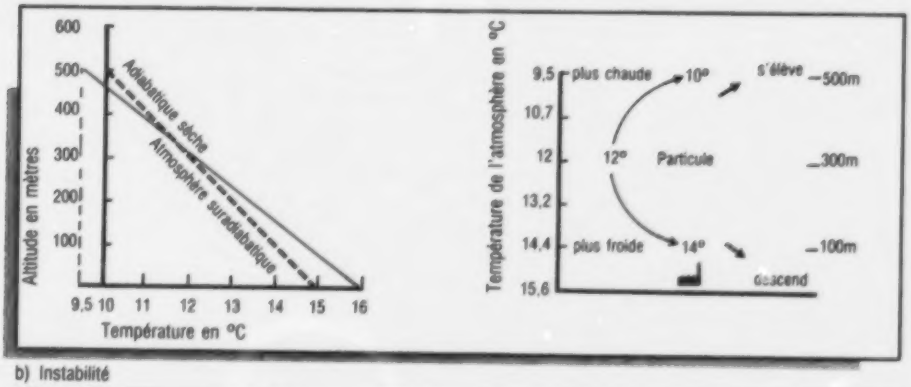
Lorsque les conditions réelles de température sont suradiabatiques, c'est-à-dire que la décroissance de température est supérieure au gradient adiabatique sec (figure 5 b), on dit que l'air est instable. Ainsi, lorsqu'une parcelle d'air est déplacée vers le haut, celle-ci aura tendance à accélérer son ascension parce qu'elle est plus chaude que l'air ambiant, donc moins dense. Inversement, toute particule qui amorcera un mouvement de descente restera plus froide que l'air environnant, donc plus dense, et poursuivra son mouvement vers le bas.

Lorsque la décroissance verticale est inférieure au gradient adiabatique sec (figure 5 c), on dit que l'atmosphère est stable. Ainsi, lorsqu'une parcelle d'air est soumise à un mouvement ascendant, elle est plus froide que l'air environnant, donc plus dense, et a tendance à redescendre. Inversement, si on déplace une particule d'air vers le bas, celle-ci est plus chaude que l'air environnant, donc moins dense, et a tendance elle aussi à rejoindre son niveau initial.

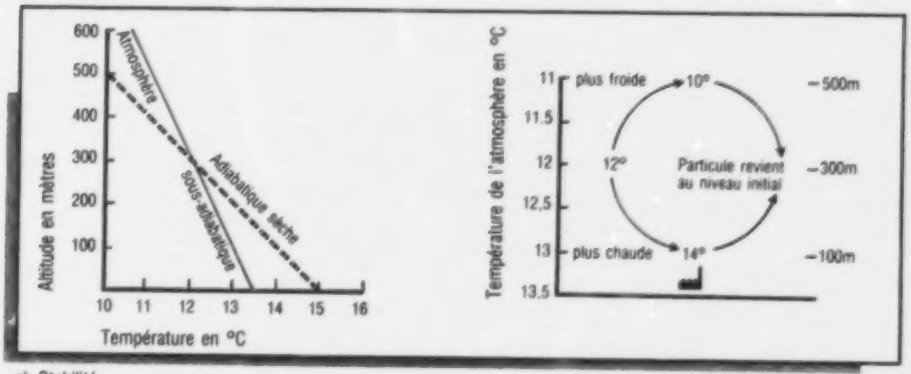
À cause de certains facteurs météorologiques, il arrive que la température de l'air augmente avec l'altitude. Cette structure verticale des températures est appelée inversion. Notons que les inversions peuvent se produire en surface ou en altitude et que des phénomènes différents sont à leur origine. La stabilité de l'air y est plus grande que dans les conditions sous-adiabatiques (figure 5 d). Il va sans dire que ces diffé-



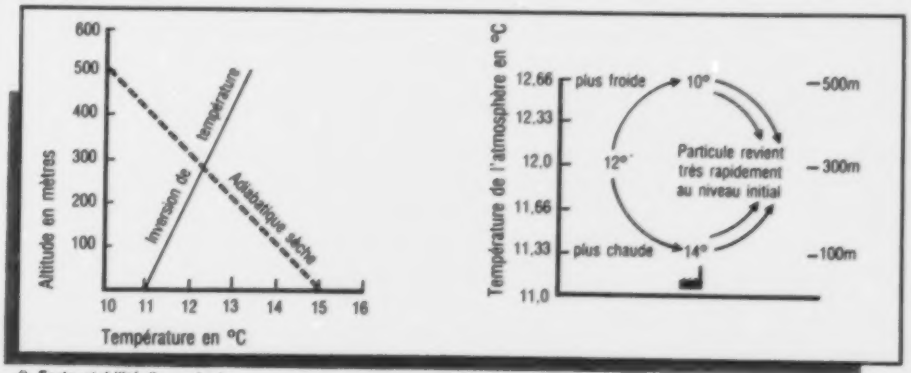
a) Neutralité



b) Instabilité



c) Stabilité



d) Forte stabilité (inversion)

FIGURE 5 — **Effets des conditions de stabilité atmosphérique sur le comportement d'une particule d'air**

D'après J.P. Détrie, 1979

rents gradients thermiques ou combinaisons de gradients ont des effets fort variables sur la diffusion des contaminants, la plupart des graves épisodes de pollution atmosphérique étant associés à des inversions de température.

Pour visualiser l'impact de la structure verticale de la température, examinons le comportement des panaches de fumée pour quelques conditions de stabilité (figure 6). En présence d'un gradient suradiabatique, les panaches deviennent sinueux (a). Ce type d'instabilité se produit lorsqu'il y a un fort ensoleillement et que les vents sont légers. Il arrive dans ce cas que des concentrations élevées de contaminants se retrouvent momentanément à proximité de la source. Lorsque le gradient thermique est adiabatique ou légèrement stable, les panaches ont plutôt tendance à être coniques parce que le brassage, tant vertical qu'horizontal, n'est pas aussi intense que dans le cas précédent (b). Dans des conditions d'inversion de température, le brassage vertical est pratiquement nul. Les panaches s'étalent à l'horizontale, ce qui se produit surtout la nuit, lorsque le vent est léger (c). Des panaches tourmentés vers le haut se produisent lorsqu'il se forme une couche suradiabatique au-dessus d'une couche d'inversion. On les observe surtout à l'approche du coucher du soleil lorsque le ciel est dégagé (d). Des panaches d'enfumage surviennent lorsque l'on retrouve une couche d'air instable sous une couche d'inversion. De fortes concentrations peuvent alors s'accumuler au sol. Ce phénomène est favorisé surtout pendant les matinées d'été, lorsque le ciel est clair et que les vents sont légers (e). Quand la couche sous une inversion de température est légèrement stable ou neutre, on peut observer des panaches piégés (f).

Les gradients thermiques décrivent généralement un cycle quotidien, surtout dans les premières centaines de mètres au-dessus du sol. Examinons de plus près ce cycle tout en considérant les modifications qu'ils entraînent sur le comportement d'un panache de fumée (figure 7). La nuit, lorsque le ciel est clair, le sol et les premières couches de l'atmosphère se refroidissent et entraînent la formation d'une couche d'inversion. Celle-ci limite la dispersion verticale des contaminants. Au début de la journée, l'air près du sol est réchauffé et un gradient suradiabatique s'établit, détruisant progressivement l'inversion nocturne. C'est ainsi que des périodes d'enfumage peuvent survenir momentanément lorsque la couche d'air instable atteint un panache de fumée. L'inversion disparaît le plus souvent avant la fin de la matinée et est remplacée par une couche de mélange (ou couche de brassage) jusqu'à ce que se reforme l'inversion nocturne à l'approche du coucher du soleil. Le sommet de la couche de mélange est appelé hauteur de mélange. Disons en général que, par beau temps, la hauteur de mélange est à peu près nulle au lever du soleil et qu'elle augmente jusqu'en après-midi pour rejoindre la couche limite. La hauteur de mélange est un paramètre d'évaluation important pour déterminer le potentiel météorologique d'épisodes de pollution de l'air. Lorsque le temps est venteux ou nuageux, le cycle quotidien précédemment décrit est atténué.

En milieu urbain, il est fréquent d'observer une structure thermique différente, surtout la nuit, par vent faible et ciel dégagé. Les nombreuses sources de chaleur d'une grande ville (industries, chauffage domestique et industriel, automobiles, etc.) modifient le climat urbain à un point tel que la température de l'air y est habituellement plus élevée qu'à la campagne (environ 2 °C).

D'autres facteurs, comme l'inertie thermique du béton, de l'asphalte et de la brique, le relief aérodynamique des centres urbains qui favorise le brassage de la couche d'air de surface et la pollution urbaine, s'opposent aussi à la mise en place d'une inversion nocturne de surface. La présence d'un îlot urbain de chaleur modifie donc sensiblement le cycle quotidien du gradient thermique, de sorte qu'une couche instable persiste dans les basses couches de l'atmosphère sous une couche d'air stable en altitude qui emprisonne les contaminants (figure 8).

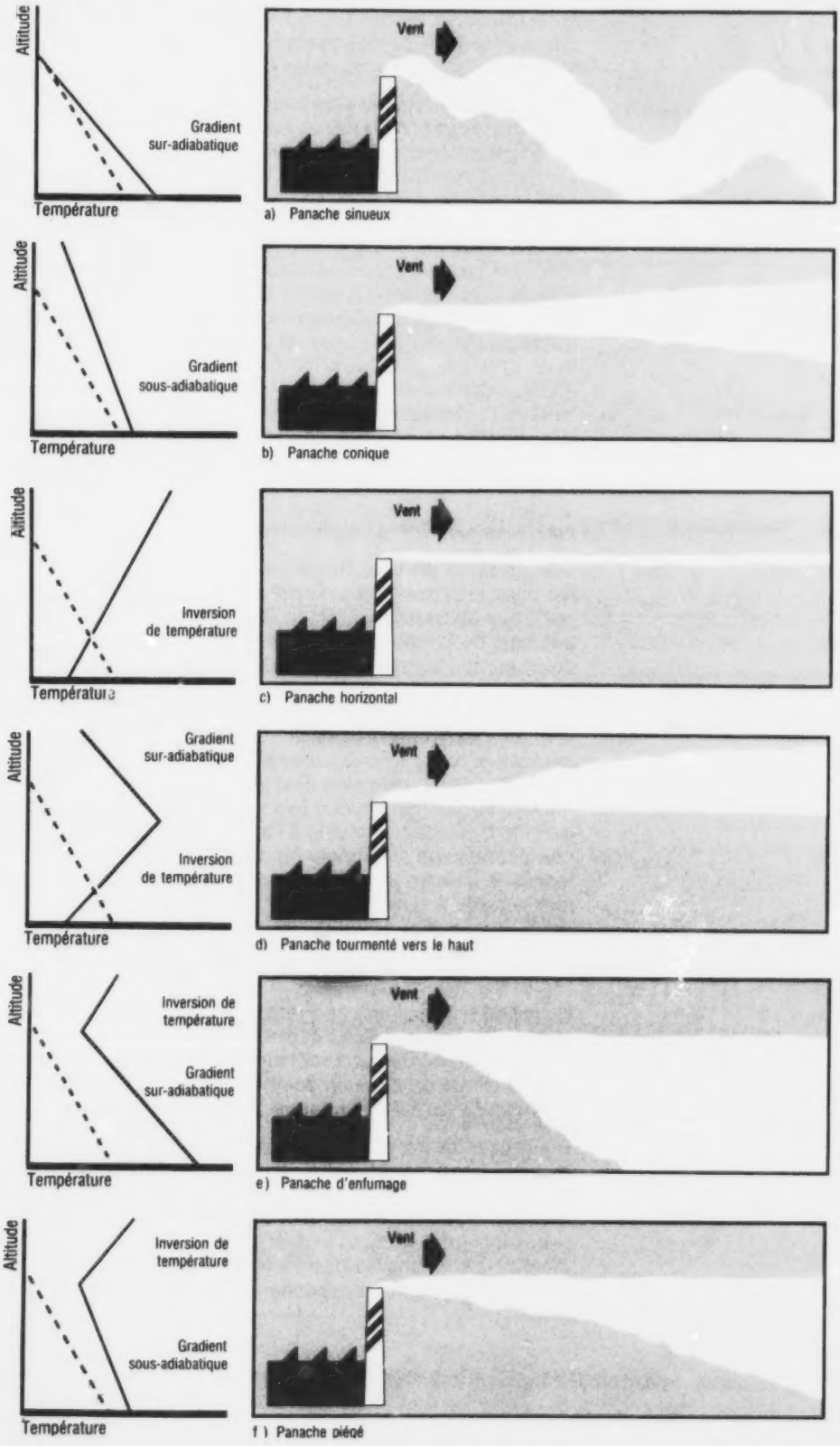
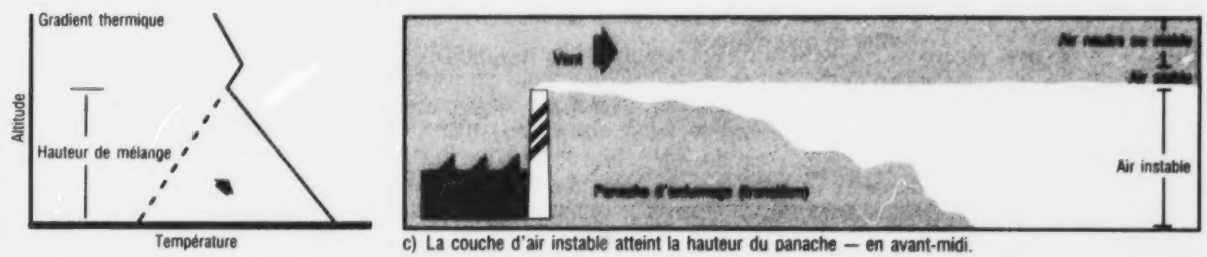


FIGURE 6 — **Exemples de comportement de panache selon la structure verticale de la température**

Évolution de la stabilité de l'air

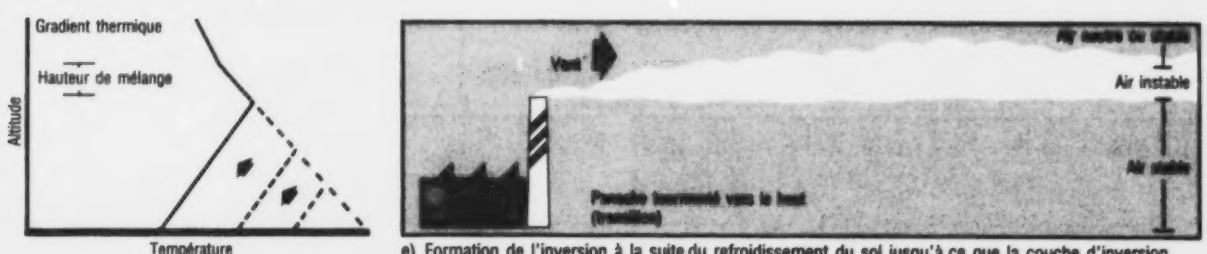
a) Inversion — avant le lever du soleil.

b) Destruction de l'inversion à la suite du réchauffement progressif de l'atmosphère à partir du sol — peu après le lever du soleil et au cours de l'avant-midi.



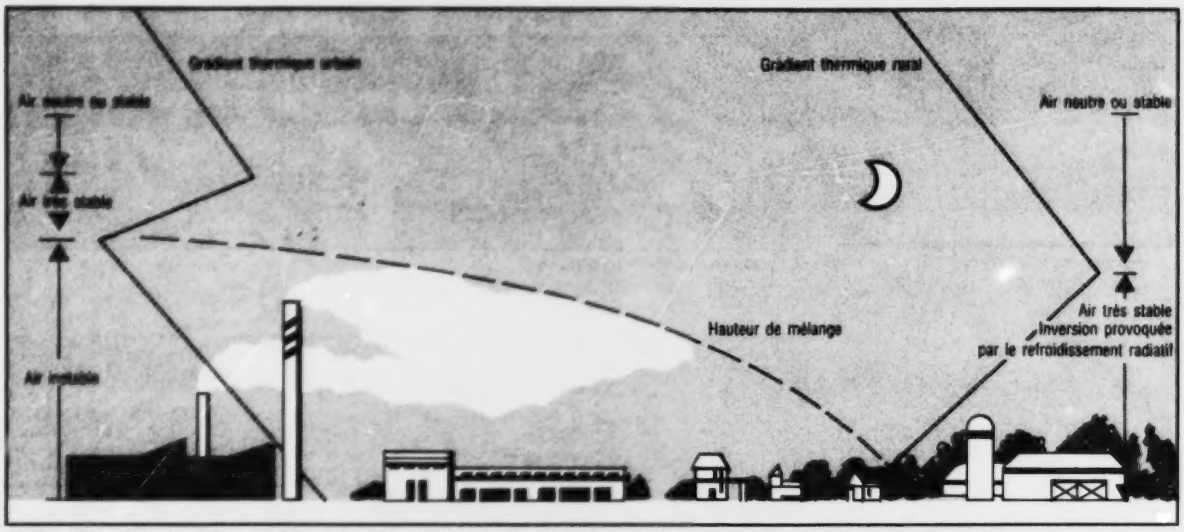
c) La couche d'air instable atteint la hauteur du panache — en avant-midi.

d) La hauteur de mélange atteint le niveau de la couche limite — début de l'après-midi.



e) Formation de l'inversion à la suite du refroidissement du sol jusqu'à ce que la couche d'inversion atteigne la hauteur du panache — peu après le lever du soleil et au cours de la nuit.

FIGURE 7 — **Influence du cycle quotidien du gradient thermique sur le comportement d'un panache (par vent faible et ciel dégagé)**

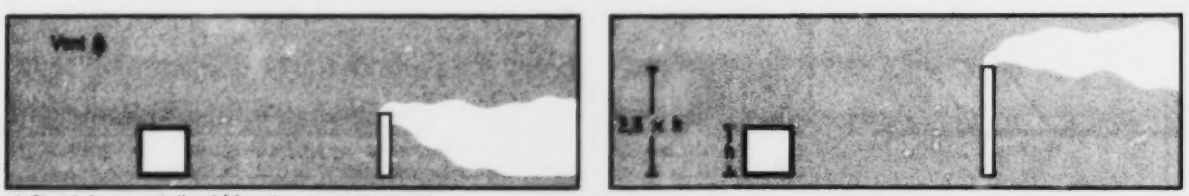


L'effet d'îlot urbain de chaleur empêche la formation d'une inversion de surface. Le brassage persiste donc dans les couches inférieures et des courants ascendants favorisent la dispersion verticale des contaminants. Ceux-ci peuvent se concentrer dans la couche d'inversion. Le jour, l'inversion en altitude est détruite la plupart du temps par le réchauffement des basses couches de l'atmosphère.

FIGURE 8 — **Modification du gradient thermique nocturne en milieu urbain (par vent faible et ciel dégagé)**

a) Cheminée en amont d'un bâtiment par rapport au vent

b) Cheminée sur un bâtiment



c) Cheminée en aval d'un bâtiment par rapport au vent

FIGURE 9 — **Effets d'un bâtiment et de la hauteur des cheminées sur la dispersion des contaminants atmosphériques**

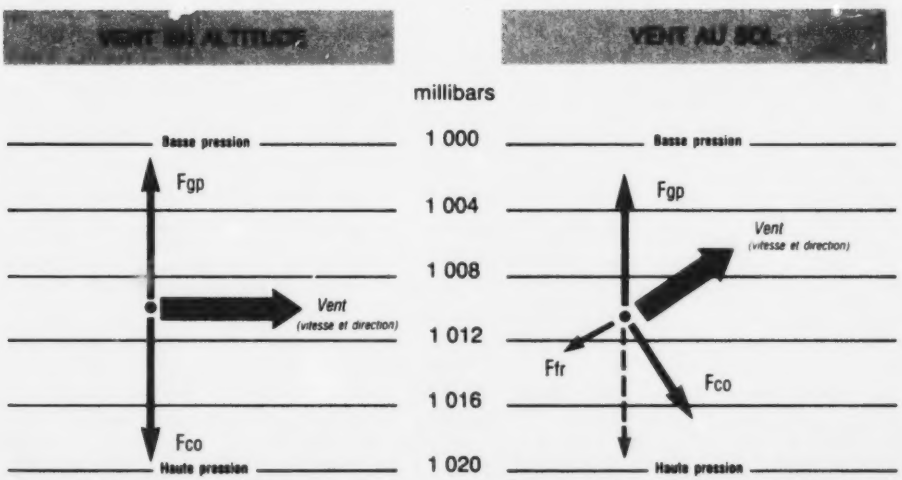
3.2.2 *La turbulence mécanique*

Le gradient thermique n'est qu'un indice du pouvoir dispersif de l'atmosphère. La diffusion des contaminants atmosphériques est aussi influencée par la turbulence d'origine mécanique que l'on associe à la friction du vent sur la surface rugueuse du sol. L'intensité de la turbulence due à la friction est fonction de la vitesse du vent, de la taille des obstacles et du degré d'instabilité de l'air.

Tous les obstacles (montagnes, collines, forêts, arbres, bâtiments) modifient l'écoulement de l'air et affectent la dispersion des contaminants. Ainsi à l'approche d'un obstacle, tel un bâtiment, l'écoulement de l'air est modifié de telle façon qu'il se produit une accélération du vent autour de l'obstacle ainsi qu'une cavité dans laquelle on observe un écoulement de retour. Une situation similaire se produit derrière un gros rocher dans un cours d'eau. Les contaminants émis par une source ponctuelle ont tendance à s'accumuler sous le vent d'un obstacle à cause de la géométrie d'écoulement de l'air par rapport à cet obstacle. Des problèmes analogues peuvent survenir lorsqu'un bâtiment se situe devant une cheminée, par rapport au vent, ou lorsque la cheminée est située sur un bâtiment. On assume généralement qu'une cheminée dont la hauteur est au moins 2,5 fois plus haute par rapport au sol que les édifices environnants évite, dans plusieurs cas, ces problèmes (figure 9).

3.2.3 *Le vent*

Le vent se définit simplement comme étant le déplacement de l'air. Le vent en altitude (au-delà de 1000 mètres) résulte de l'équilibre géostrophique entre la force du gradient de pression et la force de Coriolis. La force du gradient de pression s'exerce des zones de haute pression vers les zones de basse pression. L'air chaud des basses pressions (moins dense) s'élève et est remplacé par l'air froid des hautes pressions (plus dense). La force de Coriolis dévie le mouvement de l'air de 90°, vers la droite dans l'hémisphère nord, vers la gauche dans l'hémisphère sud. Au niveau du sol, la force de friction a pour effet de ralentir la vitesse du vent et de modifier sa direction (figure 10).



La force de Coriolis (Fco). est égale et opposée à la force du gradient de pression (Fgp). Le vent est parallèle aux isobares.

À cause de la force de friction (Ffr), la vitesse du vent diminue. Cette réduction entraine une diminution de la force de Coriolis. Le vent souffle ainsi au travers des isobares.

FIGURE 10 — **Vent en altitude et vent au sol**

Le transport des contaminants atmosphériques est régi par des mouvements de l'air dont la force d'entraînement peut s'exercer à une échelle locale (vents au niveau du sol), régionale ou planétaire (vents en altitude). Aux latitudes moyennes de l'hémisphère nord, la circulation générale de l'air s'effectue dans un axe orienté du sud-ouest au nord-est.

3.2.4 *Influences de certaines conditions météorologiques sur la qualité de l'atmosphère*

Au Québec, les conditions météorologiques les plus défavorables à la dispersion des contaminants se retrouvent dans certains systèmes synoptiques comme à l'avant d'un front chaud (vent moyen, air stable, couche limite basse, masse d'air provenant de zones polluées) et dans les hautes pressions hivernales associées à de l'air chaud en altitude (vents légers, stabilité très grande, hauteur de la couche limite très basse). Le premier cas représente une situation de courte durée tandis que le second est responsable des pires conditions de stagnation lorsqu'il persiste plusieurs jours. À l'opposé, les fronts froids favorisent normalement de faibles niveaux de pollution atmosphérique (vent élevé, couche limite élevée, air instable et masse d'air provenant de zones non polluées).

3.2.5 *Quelques exemples d'influences topographiques sur la dispersion des contaminants atmosphériques*

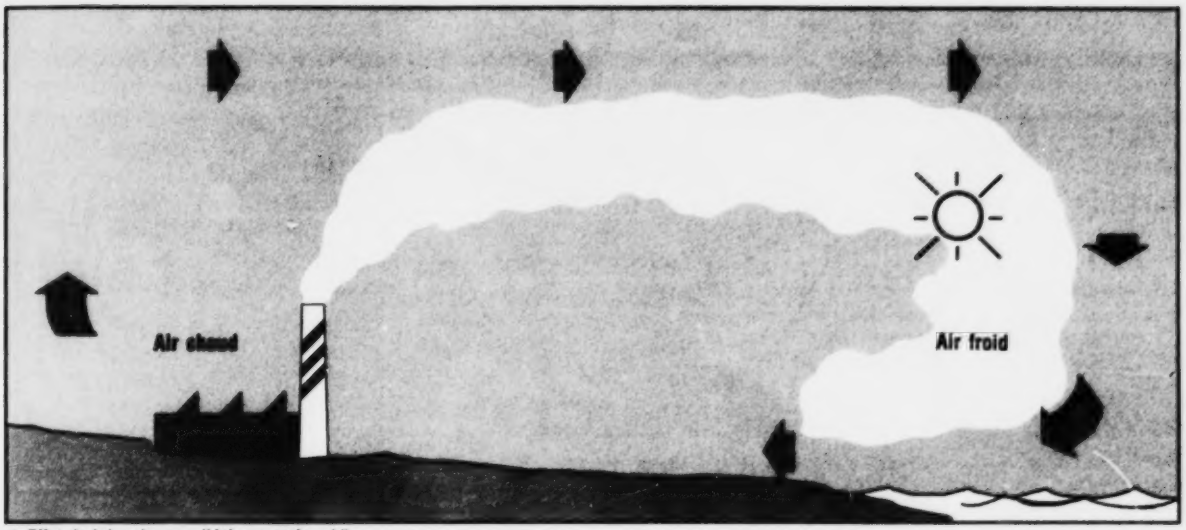
À l'échelle régionale, certaines influences topographiques associées à une structure thermique particulière peuvent causer d'importants problèmes de pollution. Examinons plus particulièrement les effets de littoral et les effets de vallée.

Les effets de littoral

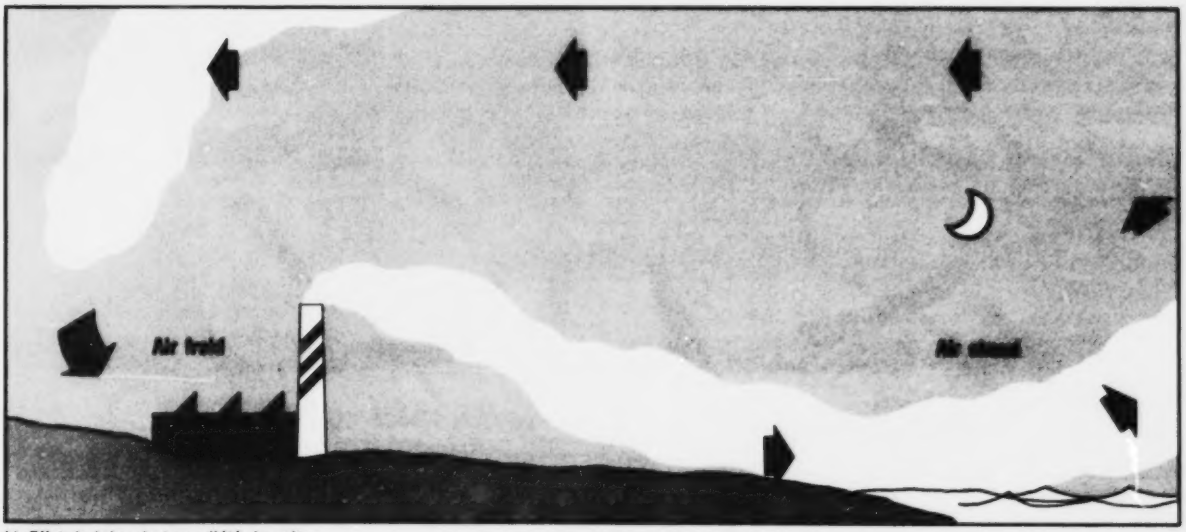
Les effets de littoral sont engendrés par les écarts de température qui existent entre l'air au-dessus de la mer et l'air au-dessus de la terre. Ils se rencontrent lorsque les conditions météorologiques sont favorables à des vents légers.

La brise de mer ou de lac s'observe lorsque l'air terrestre est plus chaud que l'air au-dessus de la masse d'eau. Au début de l'après-midi, le printemps et l'été surtout, l'air frais en provenance de la masse d'eau envahit l'atmosphère terrestre pour remplacer l'air chaud ascendant. Il s'établit un écoulement de retour vers la mer en altitude, ce qui complète le cycle. L'intensité de cette circulation est d'autant plus importante que le contraste thermique terre-mer est élevé. La circulation est inverse et moins intense dans le cas d'une brise de terre. Les brises de mer et de terre peuvent contribuer à la dispersion des contaminants ou créer de sérieux problèmes de pollution, selon la localisation et l'intensité des émissions (figure 11).

Au printemps et en été, un autre type de problème peut survenir le long d'un littoral lorsque, cette fois, le vent souffle de la mer. L'air maritime qui envahit les côtes voit sa structure thermique se modifier dans les basses couches (figure 12). L'inversion de température que l'on observe fréquemment au-dessus des grandes masses d'eau froide est graduellement érodée à sa base par une couche de brassage (air instable) à mesure que l'air maritime pénètre à l'intérieur des terres plus chaudes. Ainsi, les contaminants émis dans l'atmosphère stable sont peu dispersés jusqu'à ce qu'ils soient interceptés par la couche de brassage et rabattus vers le sol. Contrairement à l'enfumage momentané produit lors de la destruction de l'inversion nocturne, telle que décrite plus tôt à la figure 7, l'enfumage du littoral peut persister pendant des périodes prolongées, notamment lorsqu'un anticyclone (haute pression) se maintient de façon stationnaire au-dessus de la masse d'eau.



a) Effet de brise de mer: l'été, en après-midi



b) Effet de brise de terre: l'été, la nuit

FIGURE 11 — **Effets de littoral lorsque les vents sont légers**

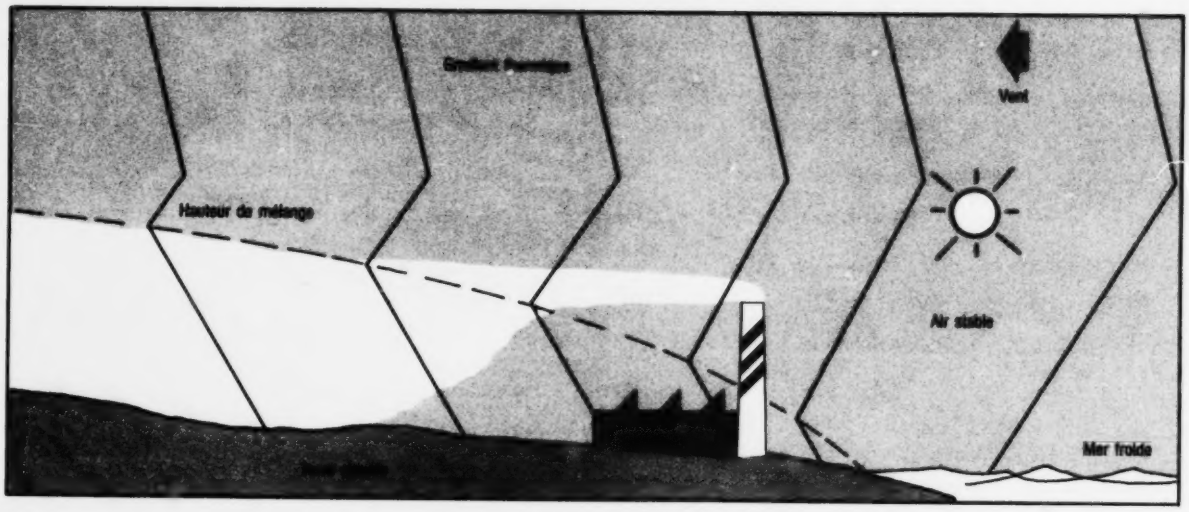
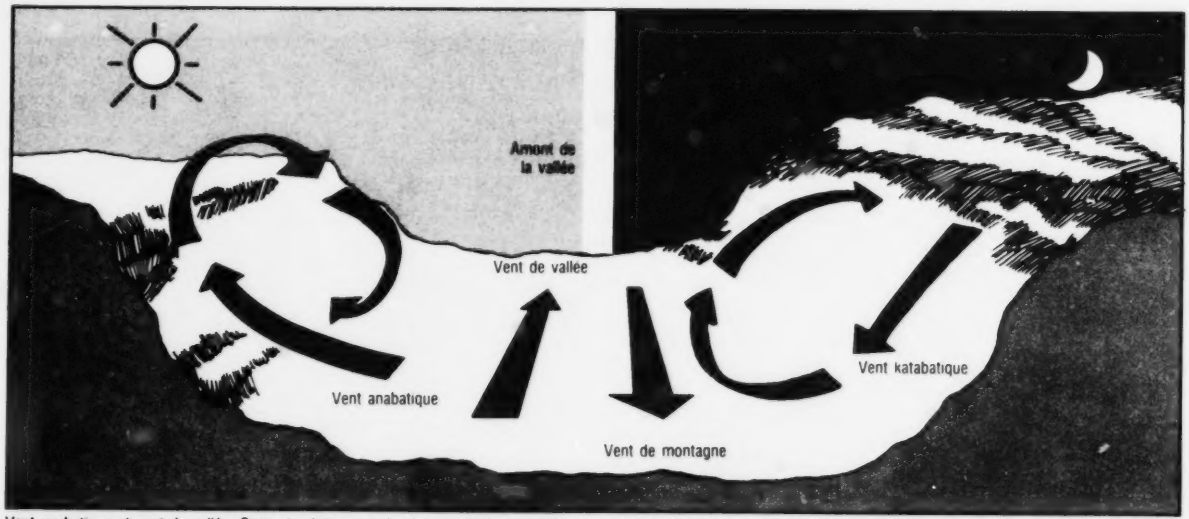
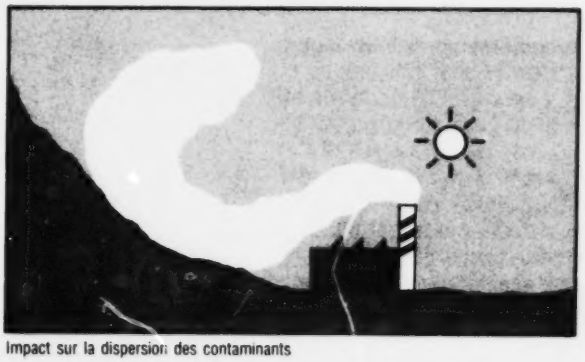


FIGURE 12 — **Enfumage du littoral associé à un vent soufflant de la mer**



Vent anabatique et vent de vallée. Cette circulation est plus intense l'été et associée au vent en altitude.

Vent katabatique et vent de montagne. Cette circulation est plus intense en hiver et dissociée des vents en altitude.



Impact sur la dispersion des contaminants

Impact sur la dispersion des contaminants

FIGURE 13 — **Vent anabatique et vent de vallée; vent katabatique et vent de montagne**

Effets de vallée

Pendant le jour et lorsque le vent est faible ou nul, l'air se réchauffe plus rapidement au-dessus des pentes de la vallée que dans le fond de la vallée. L'air a donc tendance à gravir les pentes (vent anabatique). Un mouvement analogue, c'est-à-dire l'air froid remplaçant l'air chaud ascendant, génère une circulation d'air de la plaine vers la vallée (vent de vallée). La nuit, le contraire se produit. L'air au-dessus des pentes se refroidit rapidement et s'écoule par gravité vers la vallée (vent katabatique). L'air froid pourra alors s'écouler tel un cours d'eau vers la plaine (vent de montagne). Ces mouvements atmosphériques de petites échelles peuvent aussi influencer la dispersion des contaminants atmosphériques (figure 13).

Dans les vallées, il n'est pas rare d'observer des gradients thermiques particuliers qui résultent de l'accumulation dans les basses couches d'air froid plus dense. Ces structures thermiques provoquent des conditions d'extrême stabilité, surtout lorsque la hauteur de l'inversion est inférieure à celle des pentes (figure 14). Les contaminants atmosphériques peuvent être piégés dans la couche d'inversion et s'y concentrer parfois pendant de longues périodes lorsque la couche d'inversion persiste plusieurs jours. Cette situation est à l'origine de plusieurs des graves épisodes de pollution dont nous parlerons plus loin.

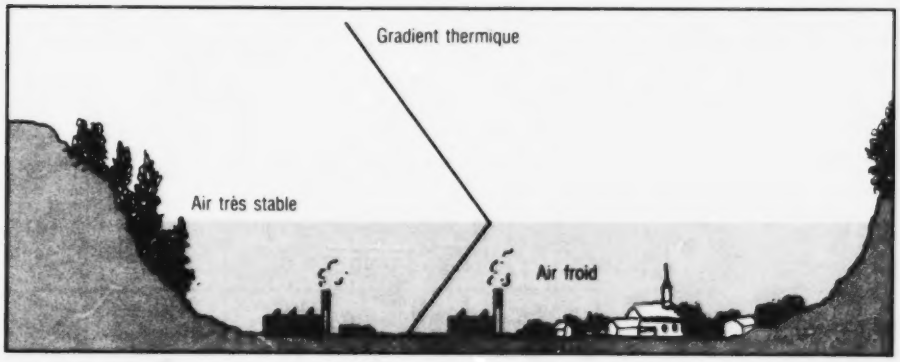


FIGURE 14 — **Effet de vallée**

3.3 *Les mécanismes d'élimination des contaminants et leur durée de séjour dans l'atmosphère*

On distingue trois types de mécanismes d'élimination des contaminants particulaires et gazeux: les réactions chimiques dans l'atmosphère, l'entraînement par les précipitations et le dépôt à la surface sous-jacente.

Les réactions chimiques dans l'atmosphère transforment les contaminants émis en d'autres composés souvent plus toxiques que les premiers. À titre d'exemple, nous avons vu au chapitre 2 que le SO_2 réagit dans l'atmosphère et se transforme plus ou moins rapidement en acide sulfurique ou en sulfates. Nous avons vu aussi que l'ozone se forme sous l'action des rayons solaires sur les oxydes d'azote dans une atmosphère contaminée par des hydrocarbures.

Les mécanismes d'entraînement par les précipitations sont très efficaces pour l'élimination des particules et de certains contaminants gazeux de l'atmosphère. Cet entraînement se réalise, soit par la capture des contaminants par les gouttelettes à l'intérieur de nuages, soit par le lessivage des contaminants par la pluie ou la neige. Ces mécanismes sont aussi appelés «processus de dépôt humide» et sont illustrés à la figure 15.

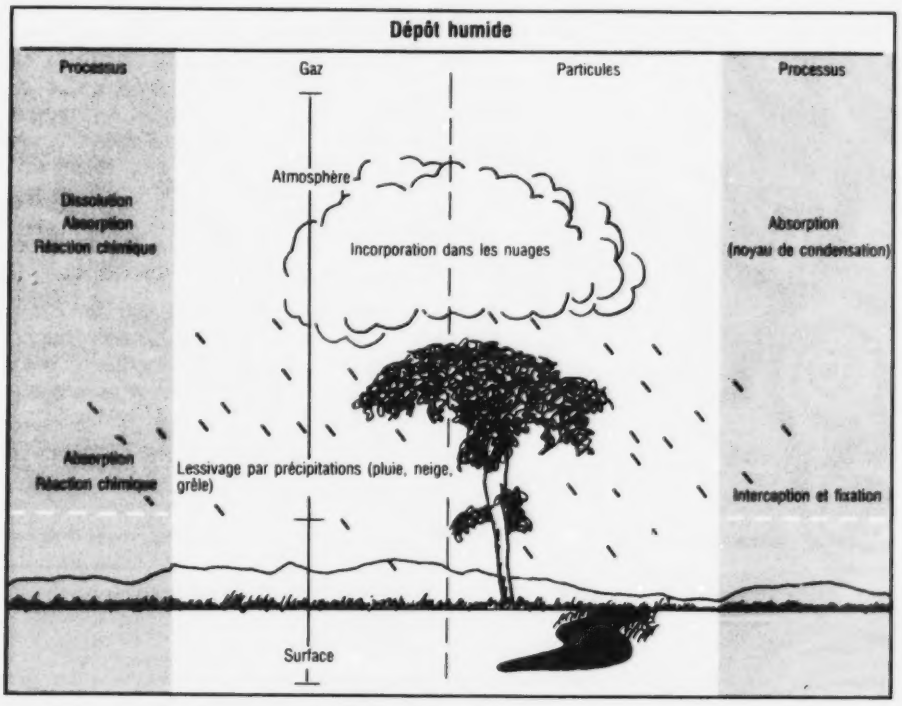


FIGURE 15 — **Processus de dépôt humide**

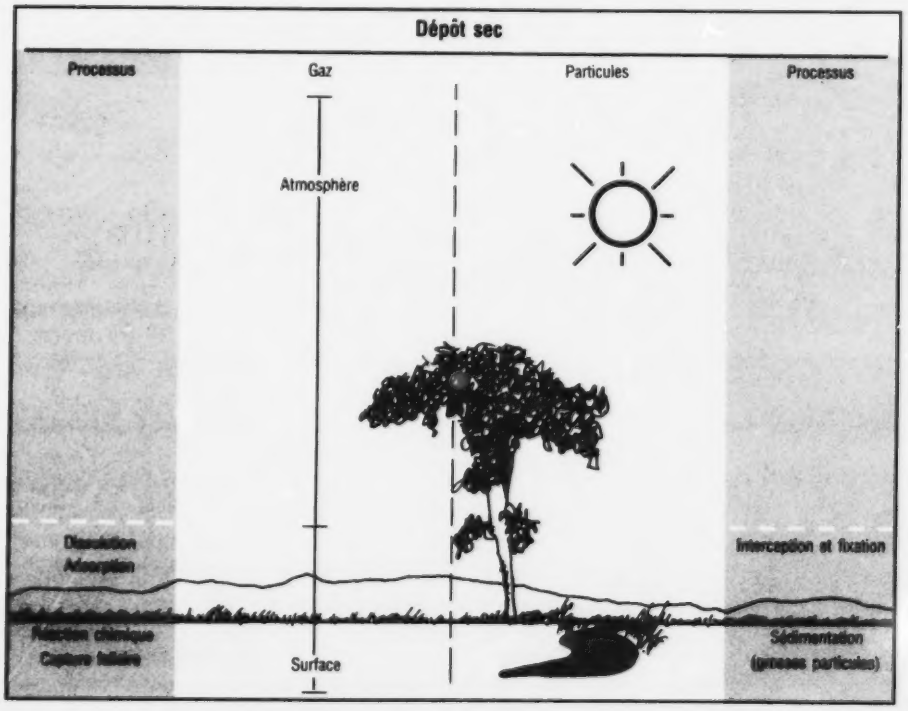


FIGURE 16 — **Processus de dépôt sec**

Les mécanismes de dépôt à la surface sous-jacente, comme la sédimentation, la capture par la végétation, l'adsorption, la dissolution dans les lacs et les océans, sont aussi appelés «processus de dépôt sec» (figure 16). Le tableau 5 présente un sommaire des mécanismes d'élimination pour certains contaminants.

La durée de séjour d'un contaminant permet de déterminer jusqu'à quelle échelle l'influence de celui-ci peut affecter les récepteurs. Une longue durée de séjour (plus d'un an) implique qu'un contaminant peut être transporté tout autour de la planète avant d'être éliminé ou transformé par l'un ou l'autre mécanisme. C'est le cas notamment des chlorofluorométhanes (fréons) et du dioxyde de carbone (CO_2). Les durées de séjour variant de quelques jours à quelques semaines correspondent aux échelles régionale et continentale. C'est le cas des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre. La figure 17 montre les échelles spatiales qui caractérisent certains contaminants atmosphériques en relation avec la distance de transport et le temps de séjour dans l'atmosphère.

Les effets de ces contaminants ou de leurs dérivés peuvent ainsi se faire sentir à diverses échelles sur différents récepteurs: les êtres humains, les animaux, la végétation, les matériaux divers et le milieu atmosphérique lui-même. Cet aspect fait l'objet du chapitre 4.

TABLEAU 5 — **Résumé des mécanismes d'élimination de certains contaminants atmosphériques**

CONTAMINANTS	MILIEU ATMOSPHÉRIQUE	MILIEU TERRESTRE	MILIEU AQUATIQUE
Dioxyde de soufre	Nettoyage par les précipitations: capture et lessivage par la pluie et la neige. Transformation chimique en sulfates	Sol: dégradation microbienne, réactions chimiques, absorption. Végétation: absorption et adsorption sur les surfaces, absorption par les stomates	Absorption à la surface des lacs et des océans
Hydrogène sulfuré	Oxydation en dioxyde de soufre		
Oxydes d'azote	Transformation chimique en nitrates. Réaction photochimique avec les hydrocarbures	Sol: réaction chimique. Végétation: absorption et adsorption sur les surfaces, absorption par les stomates	
Monoxyde de carbone	Réaction avec les radicaux hydroxyles dans la stratosphère	Sol: activité microbiologique	
Dioxyde de carbone		Végétation: photosynthèse, absorption	Absorption à la surface des lacs et des océans
Hydrocarbures	Transformation chimique en particules. Réaction photochimique avec les oxydes d'azote et l'ozone	Sol: activité microbiologique. Végétation: réaction bactérienne, absorption par les stomates	
Ozone	Réaction chimique avec le monoxyde d'azote	Réaction chimique avec le sol, la neige et la végétation	Réaction chimique avec la surface des océans

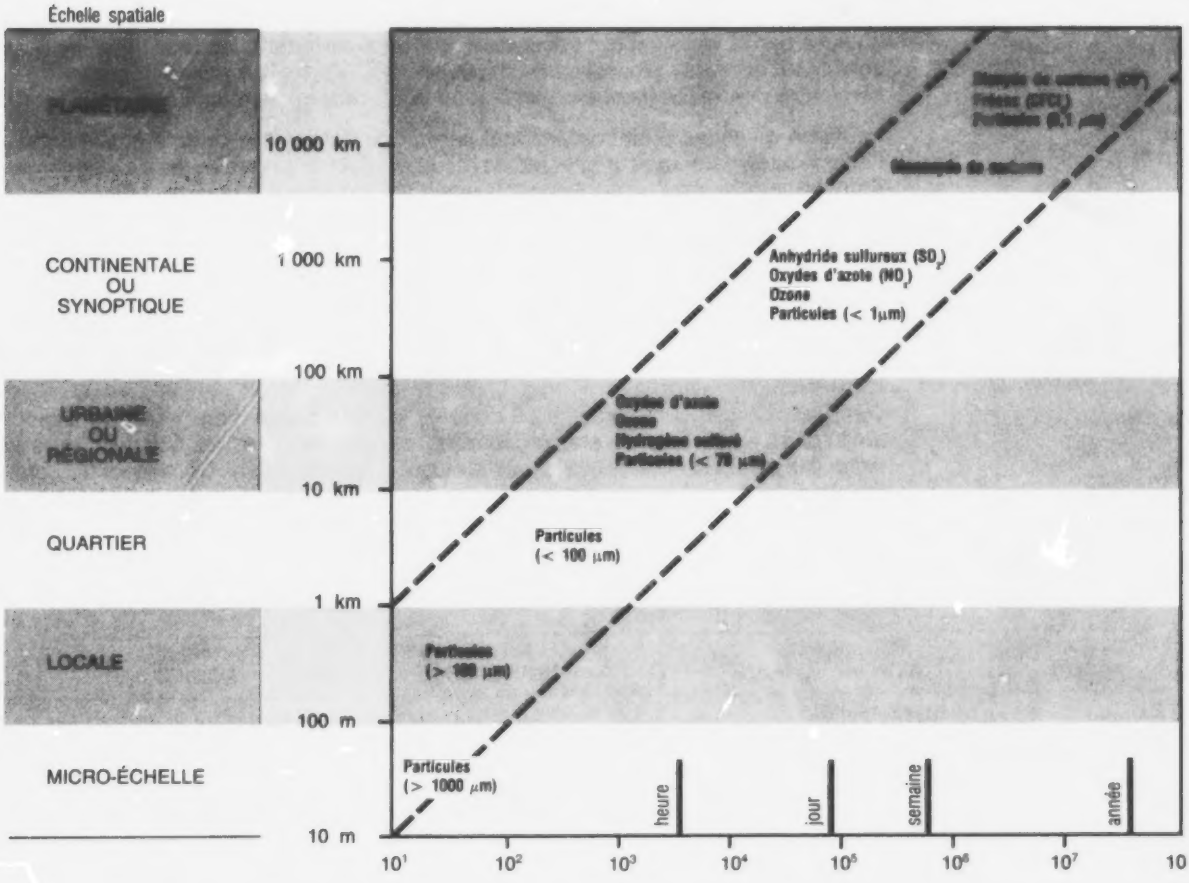


FIGURE 17 — **Échelles spatiales de la pollution atmosphérique en fonction du temps et de la distance de transport**

CHAPITRE 4

LES EFFETS DES CONTAMINANTS ATMOSPHÉRIQUES

4. Les effets des contaminants atmosphériques

Même si la pollution atmosphérique a causé, depuis toujours, une gêne pour l'environnement, il a fallu attendre de graves épisodes de pollution comme ceux de Londres, de la vallée de la Meuse et de Donora, évoqués plus tôt, avant que les chercheurs analysent de façon plus approfondie les effets des contaminants atmosphériques sur la santé humaine. Il est connu maintenant que la pollution atmosphérique peut être un facteur déterminant de la mortalité et de la morbidité chez l'homme. Les chercheurs ont également pu prouver que la pollution atmosphérique cause des effets indésirables sur les animaux, la végétation, les biens matériels et le milieu atmosphérique lui-même.

4.1 Les effets sur les êtres humains

Le dioxyde de soufre et les matières particulaires ont été identifiés comme les principaux responsables des plus dramatiques épisodes de pollution survenus au cours du dernier siècle. Dans tous les cas, ces épisodes ont été associés à des conditions météorologiques extrêmement défavorables à la dispersion des contaminants atmosphériques.

En décembre 1930, dans la vallée de la Meuse, une mortalité excédentaire de 60 à 90 décès est enregistrée après trois jours de conditions de stagnation atmosphérique. Cet excédent représente une augmentation de 10,5 pour cent par rapport à la mortalité saisonnière de l'année précédente. Les victimes sont surtout des personnes âgées. À Donora (Pennsylvanie), en octobre 1948, 17 décès sont attribués vraisemblablement à l'effet combiné du SO_2 et des particules; plus de 6000 habitants furent incommodés à divers degrés (irritation des voies respiratoires, du nez, des yeux, de la gorge).

À cause de conditions météorologiques particulières, la région londonnienne a connu de nombreux épisodes de pollution atmosphérique. Toutefois, celui de décembre 1952 fut sans contredit le plus meurtrier. Après seulement une douzaine d'heures d'un brouillard très dense et d'accumulation de contaminants atmosphériques, de nombreux habitants commencent à ressentir des troubles respiratoires. À la fin des quatre jours que dura l'épisode, on a évalué à 4000 le nombre de décès attribuables à la pollution; les personnes âgées et les très jeunes enfants furent les plus touchés. Les teneurs en fumée et en SO_2 ont été de cinq à six fois plus élevées qu'en temps normal.

D'autres épisodes de pollution atmosphérique résultent d'accidents industriels comme celui survenu en décembre 1984, à Bhopal en Inde, le plus récent et le plus meurtrier. L'émission accidentelle d'un composé toxique, l'isocyanate de méthyle, y a causé la mort d'environ 2500 personnes et gravement atteint 20 000 autres au cours de ce que l'on a appelé «la plus grande catastrophe technologique de l'histoire». Ce gaz provoque un œdème pulmonaire aigu et plusieurs des personnes qui y ont été exposées demeureront aveugles.

4.1.1 *Le mode d'action et les effets des contaminants sur l'organisme*

Les contaminants atmosphériques peuvent pénétrer de diverses façons dans l'organisme humain: absorption par la peau, ingestion et inhalation. La figure 18 schématise le cheminement de ces contaminants depuis leur pénétration dans l'organisme jusqu'à leur dépôt ou leur élimination. La réponse biologique de l'organisme humain dépend de plusieurs facteurs, comme la concentration ambiante et la durée d'expo-

sition. La figure 19 montre certains effets du SO_2 sur les êtres humains en fonction de diverses expositions. La respiration constitue le principal mode de pénétration des contaminants dans le corps humain. Il est donc normal que les organes du système respiratoire soient les plus exposés aux contaminants atmosphériques même si d'autres organes peuvent être affectés à la suite de leur pénétration dans le système respiratoire. Avant d'élaborer sur l'impact des contaminants atmosphériques, nous décrirons succinctement l'appareil respiratoire.

L'appareil respiratoire se subdivise en trois parties principales: le segment nasopharyngien, le segment trachéobronchique et le segment pulmonaire. Ces diverses subdivisions sont illustrées à la figure 20.

Le segment nasopharyngien comprend la cavité nasale et le nasopharynx. Le nez constitue la première ligne de défense du système respiratoire contre les contaminants de l'air. Le vestibule, cavité nasale située immédiatement au niveau des narines, est garni de poils tandis que le reste de la cavité est tapissé d'une muqueuse.

Le segment trachéobronchique comprend la trachée et l'arbre bronchique jusqu'aux bronchioles terminales. Le segment trachéobronchique ainsi que le segment nasopharyngien sont tapissés d'un épithélium cilié recouvert de mucus.

Le segment pulmonaire constitue la surface fonctionnelle du système respiratoire où s'effectuent les échanges d'oxygène et de gaz carbonique entre l'air et le sang. Il se compose de bronchioles respiratoires, des conduits alvéolaires, des sacs alvéolaires et des alvéoles. On rapporte que la surface alvéolaire totale varierait entre 25 et 80 m^2.

Les contaminants qui pénètrent dans le système pulmonaire sous forme particulaire ou gazeuse sont toxiques en eux-mêmes ou inertes. Toutefois, les particules inertes servent souvent de support à divers composés toxiques dissous ou adsorbés à la surface.

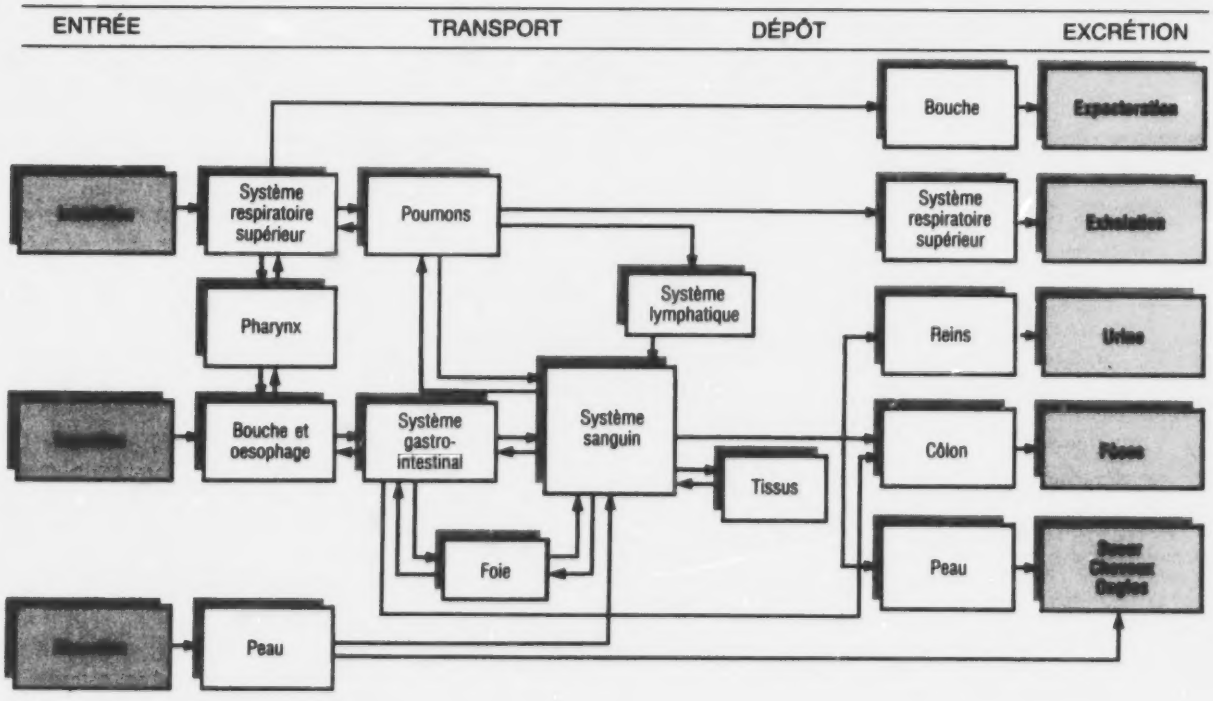


FIGURE 18 — **Modèle du cheminement des contaminants atmosphériques dans le corps humain**

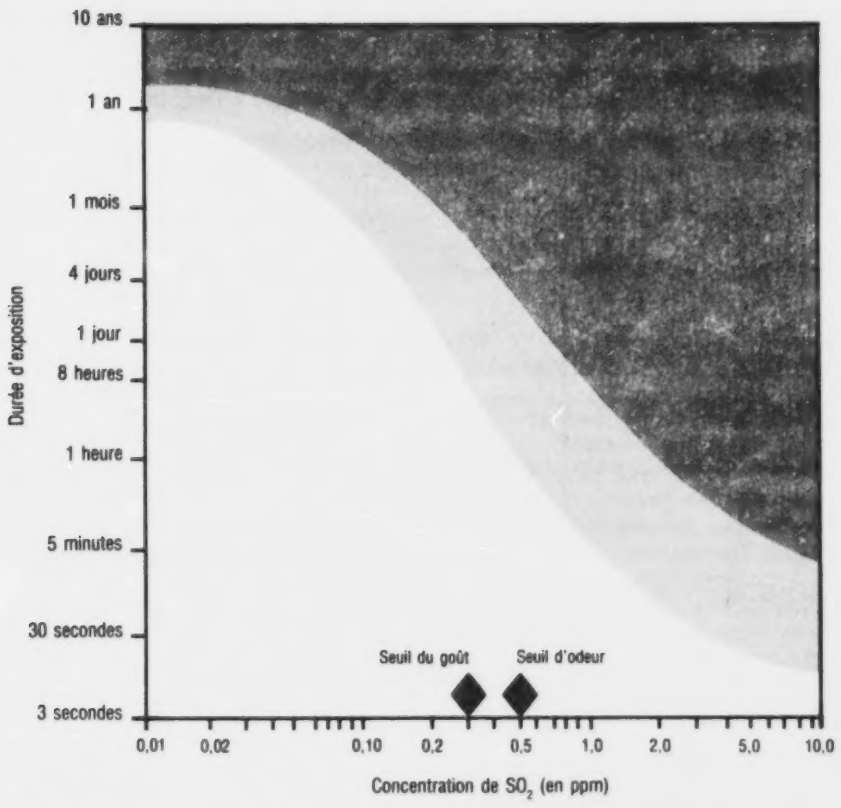


FIGURE 19 — **Effets du SO_2 sur les êtres humains en fonction de diverses expositions**

Les particules

De façon générale, les particules plus grandes que 10 μm sont captées au niveau du système respiratoire supérieur (nez et pharynx) tandis que celles plus petites que 2 ou 3 μm s'insinuent profondément, jusque dans les alvéoles pulmonaires. La figure 21 montre la fraction des particules déposées dans le système respiratoire selon leur diamètre pour un individu dont le volume de respiration et la fréquence correspondent à une activité modérée. Les particules qui pénètrent dans le système respiratoire s'y déposent suivant différents mécanismes.

Le temps de rétention des particules varie en fonction de plusieurs facteurs, dont la taille et la forme des particules, le lieu de dépôt, les caractéristiques chimiques et minéralogiques, la solubilité des particules et les mécanismes d'élimination. L'hypothèse la plus répandue en ce qui a trait à ces mécanismes suppose que l'élimination s'effectue en deux phases, l'une rapide, l'autre à long terme. Certaines particules déposées s'éliminent en quelques heures, d'autres pourront être retenues pendant plusieurs années. La vitesse d'élimination dépend, entre autres, de la vitesse à laquelle les matières déposées provoquent une réaction physiologique ou pathologique et de la quantité de matières déposées. Ainsi, on croit que les substances cancérogènes ne produisent leurs effets nocifs que dans la mesure où leurs vitesses relatives d'élimination et de dépôt sont telles qu'il subsiste dans l'organisme une concentration suffisante de la substance pour causer des lésions pathologiques. Les mécanismes d'élimination se subdivisent en deux catégories: ceux qui dépendent de l'activité ciliaire et ceux qui agissent dans la partie non ciliée du système respiratoire.

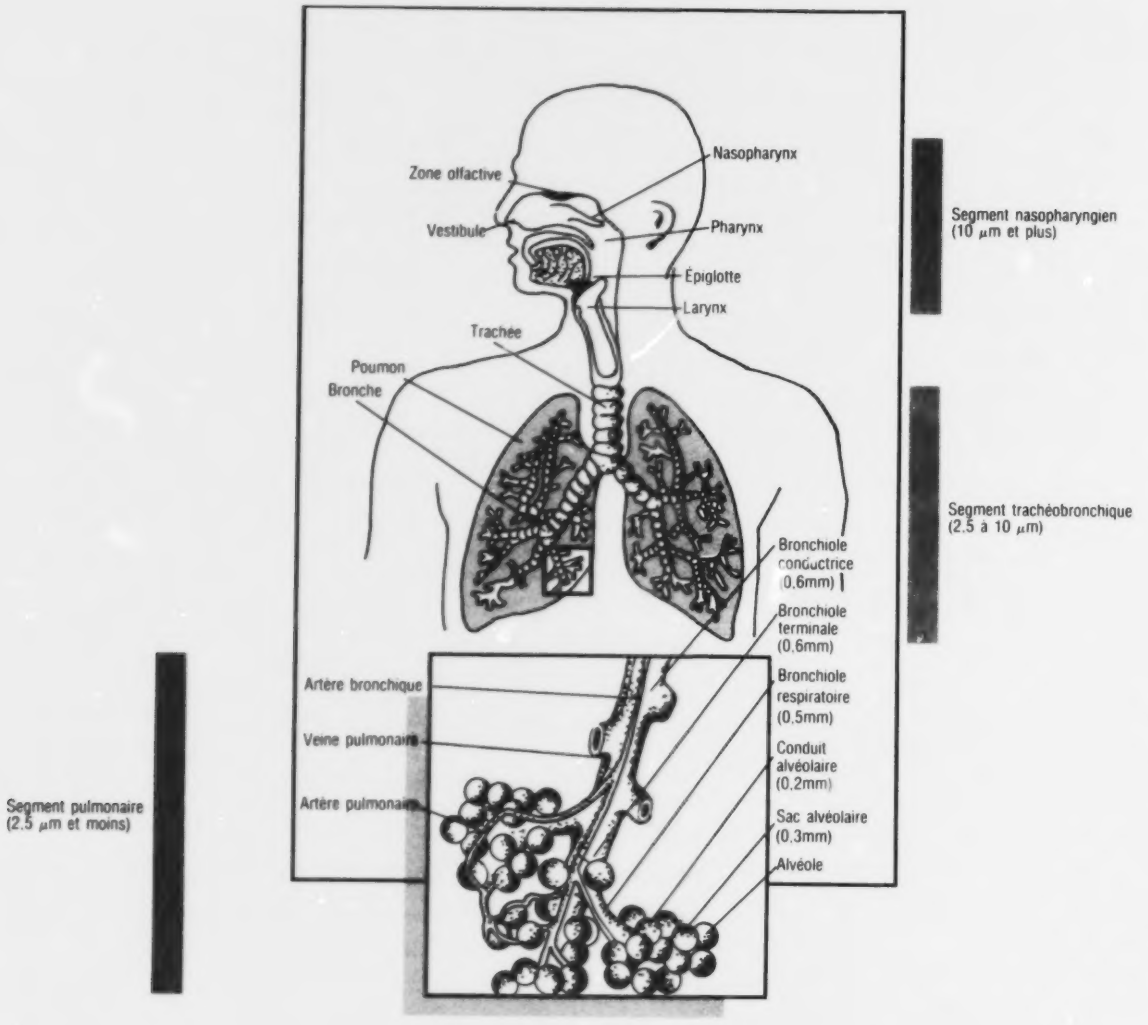


FIGURE 20 — **Système respiratoire et pénétration des particules selon leur diamètre**

Les segments nasopharyngien et trachéobronchique sont recouverts, comme nous l'avons indiqué précédemment, d'une couche de mucus. Celui-ci est constamment déplacé vers le haut par l'action des cils de l'épithélium que l'on retrouve jusqu'aux bronchioles terminales, ce qui permet l'évacuation des particules vers le système gastro-intestinal. Au niveau du segment pulmonaire, le mécanisme d'élimination est celui qui fait appel aux macrophages. Les macrophages sont des cellules à fonction phagocytaire de l'épithélium de la surface alvéolaire. Ces cellules ont la propriété d'englober et de détruire, en les digérant, les particules étrangères, empêchant ainsi les lésions et l'irritation de l'épithélium alvéolaire et limitant leur pénétration dans les tissus pulmonaires.

Plusieurs facteurs comme la nature, la taille et la forme des particules, la fréquence des expositions, l'influence de gaz irritants (comme le SO_2), la présence d'infections virales et le tabagisme peuvent affecter les mécanismes d'élimination des particules du système respiratoire.

L'exposition prolongée à des poussières fibrogènes, tels l'amiante et la silice, provoquent des pneumoconioses (amiantose et silicose) lorsque les poussières sont pré-

sentes en concentrations élevées comme c'est le cas, notamment, des maladies en milieu industriel. Les poussières fibrogènes se définissent par leur action de durcissement généralement irréversible des tissus. L'amiante est aussi associé à d'autres maladies: cancer du poumon, mésothélione de la plèvre et du péritoine.

Les poussières non fibrogènes provoquent des réactions tissulaires généralement réversibles. Certaines de ces poussières peuvent causer des maladies comme l'hypersensibilité, les pneumonites, l'asthme et les autres affections immunologiques, l'œdème pulmonaire, la fièvre, la bronchite chronique et les troubles de la fonction pulmonaire non accompagnés de changements morphologiques reconnus. Même les poussières dites «biologiquement inertes» (nuisances) provoquent à tout le moins une réaction des macrophages.

En dépit de leur élimination du système respiratoire, certains contaminants peuvent se déposer dans des organes spécifiques par la voie du système gastro-intestinal ou du système sanguin. Ainsi, plusieurs des composés toxiques que l'on retrouve dans les particules fines ont déjà été reconnus comme des contaminants susceptibles d'affecter sérieusement certains organes spécifiques. Le plomb peut causer l'anémie et des troubles du système nerveux. Il semble que l'exposition atmosphérique aux poussières de plomb ne présente pas de risques élevés pour la population adulte. Les risques sont toutefois plus élevés pour les enfants, particulièrement le groupe des 0 à 4 ans, parce qu'ils sont souvent en contact avec les poussières du sol et que leur système nerveux en plein développement est plus sensible que celui des personnes âgées. D'autres composés ont eux aussi été identifiés comme cancérogènes ou promoteurs d'affections diverses. Parmi ceux-ci, on retrouve les hydrocarbures polycycliques aromatiques, les dioxines, les furannes et certains métaux lourds.

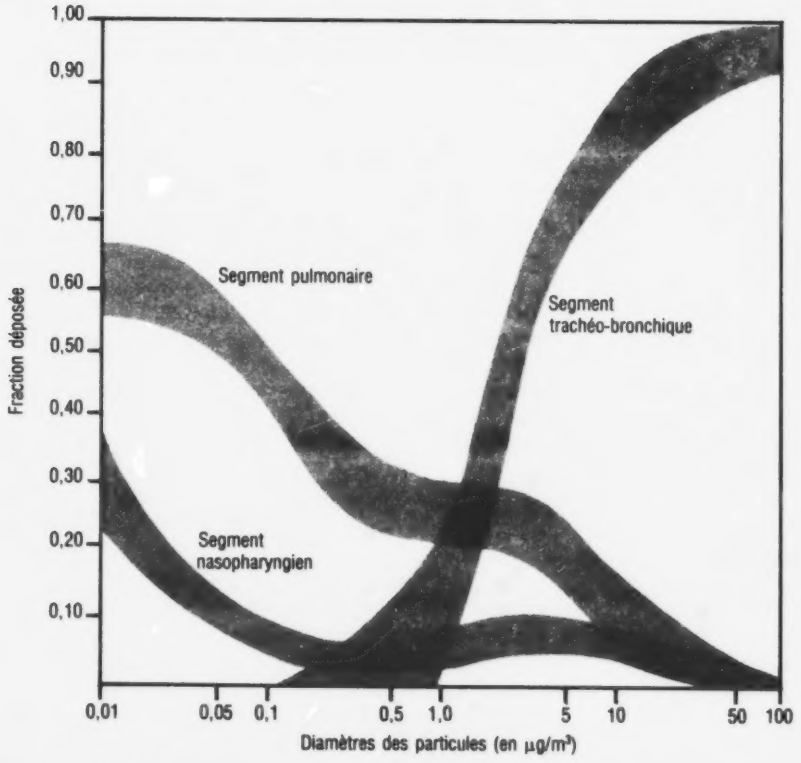


FIGURE 21 — **Dépôt des particules dans le système respiratoire selon leur diamètre**

Les gaz

Une faible partie seulement des gaz inhalés est filtrée par le nez. Si ces gaz sont irritants (SO_2, HCl, H_2S) et relativement solubles, ils sont absorbés dans les sécrétions aqueuses recouvrant le segment supérieur du système respiratoire. Il s'ensuit une irritation des cils vibratils qui, si elle est répétée, peut entraîner des modifications des cellules (prolifération ou mutation). Ces gaz irritants affectent le segment pulmonaire lorsqu'ils sont adsorbés sur des particules suffisamment fines pour atteindre les alvéoles. Ce mode d'action est souvent associé aux maladies respiratoires, notamment la bronchite chronique. Ces contaminants gazeux causent aussi des irritations des membranes du nez, des sinus nasaux ou de l'œil. Ce type d'effets caractérise l'ozone et les nitrates de peracétyle.

Les gaz non irritants et insolubles qui parviennent aux alvéoles pulmonaires peuvent être absorbés par le sang et éventuellement transportés vers les organes vitaux où ils peuvent s'accumuler. C'est le cas, par exemple, du chlorure de vinyle que l'on associe à une forme très rare de cancer du foie. Pour sa part, le monoxyde de carbone a pour effet de limiter la capacité de transport de l'oxygène par le sang, dans les tissus cellulaires. Les concentrations urbaines de CO ne sont pas suffisamment élevées pour créer des effets aigus ou chroniques, mais elles peuvent être parfois suffisantes pour accentuer chez certains individus les maladies associées à une diminution de la capacité respiratoire.

L'interaction de divers contaminants a souvent pour effet d'augmenter la toxicité des contaminants pris isolément. On appelle cette interaction «effet de synergie». L'exemple le plus connu d'effet synergétique est celui du dioxyde de soufre associé aux matières particulaires respirables. On a aussi démontré que les travailleurs de l'amiante ont un taux d'incidence du cancer du poumon huit fois supérieur à celui de la population. Or, ce taux d'incidence est 92 fois plus élevé pour les travailleurs de l'amiante qui fument que pour la population qui ne fume pas et dont le travail ne l'expose pas à l'amiante. L'effet de synergie rend encore plus difficile la compréhension des effets d'un contaminant sur la santé.

À l'opposé, on a pu démontrer que l'agressivité de certains contaminants peut aussi être inhibée à la suite de l'action neutralisante d'autres contaminants.

Les odeurs

Les odeurs en elles-mêmes ne causent pas de maladies ou de malaises particuliers, même si la population est souvent portée à le croire. Néanmoins, la gêne peut être importante parce que plusieurs composés peuvent être perçus par l'odorat à des concentrations très faibles. Des composés comme l'hydrogène sulfuré et les mercaptans sont perceptibles à des concentrations aussi faibles qu'une partie par milliard. Paradoxalement, on sait que seules les cellules tapissant la partie supérieure des fosses nasales sont sensibles aux stimuli odorants. Cette partie s'appelle l'épithélium olfactif. Encore aujourd'hui, on comprend assez mal le processus de perception des odeurs. Les problèmes psychologiques associés à un environnement atmosphérique dégradé (mauvaises odeurs et grisaille) ont par ailleurs été peu étudiés.

4.1.2 *Évaluation de l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé*

Afin d'évaluer les risques sur la santé associés aux contaminants atmosphériques, les chercheurs expérimentent en laboratoire les effets de ces contaminants sur des animaux. L'expérimentation en laboratoire est d'une grande utilité pour l'identification d'éventuelles relations de cause à effet entre les contaminants atmosphériques et l'homme. L'extrapolation à l'homme des résultats obtenus à la suite de l'expérimentation sur des animaux est souvent difficile à cause des différences qui existent entre les conditions relatives d'exposition en milieu expérimental et celles en milieu réel. En effet, les expériences portent généralement sur un nombre restreint d'animaux exposés pendant des périodes de temps assez courtes à des doses de conta-

minants souvent supérieures à celles mesurées dans l'atmosphère afin de provoquer des réactions identifiables. Or, l'être humain est exposé toute sa vie à des doses fluctuantes d'un ensemble de contaminants. De plus, les modes de pénétration des contaminants ne sont pas toujours comparables de l'un à l'autre. Ainsi, on a souvent badigeonné les animaux de substances cancérogènes afin d'obtenir des effets plus nets alors que les humains ne sont exposés à ces substances que par inhalation.

L'expérimentation en laboratoire sur l'homme est, pour des raisons évidentes, très rare, sauf dans le cas d'expériences sur des volontaires exposés à des concentrations qui ne produisent aucun effet préjudiciable irréversible. Chez l'homme, les rapports entre la pollution atmosphérique et la santé ont donc surtout été étudiés dans des enquêtes épidémiologiques.

Ce type d'enquête est particulièrement efficace pour l'étude des effets immédiats et à court terme sur la mortalité et la morbidité liés à des expositions aiguës à la pollution atmosphérique. Par contre, les enquêtes épidémiologiques traitant des effets chroniques liés à des expositions prolongées sont généralement plus problématiques. De nombreuses études ont établi qu'il existe une relation entre la pollution atmosphérique et diverses maladies respiratoires (asthme, bronchite et emphysème). D'autres études ont aussi démontré que la pollution de l'air pourrait être considérée comme un des facteurs de causalité du cancer du poumon. Toutefois, l'interaction de nombreux autres facteurs étiologiques, comme le mode de vie, le milieu de travail, le tabagisme, rend difficile la compréhension de ces relations.

Les enquêtes épidémiologiques réalisées à ce jour utilisent des approches méthodologiques variées qui démontrent clairement l'existence d'un «facteur urbain» relié aux maladies respiratoires et au cancer du poumon. Ces études ne permettent cependant pas encore de répondre à la question majeure: «Quelle est la part de la pollution atmosphérique par rapport aux autres facteurs étiologiques reliés à l'incidence de ces maladies?». On croit toutefois, dans le cas du cancer du poumon notamment, que la pollution atmosphérique ne compterait que très peu dans l'étiologie de cette maladie par rapport aux autres facteurs environnementaux, surtout le tabagisme et le milieu de travail.

4.2 *Les effets sur les animaux*

La pollution atmosphérique peut affecter à divers degrés la santé des animaux. Les observations consécutives aux graves épisodes de pollution atmosphérique de Donora (1948) et de Londres (1952) ont démontré des effets aigus sur la santé des animaux domestiques (troubles respiratoires ou décès). Comme pour les humains, il est difficile d'évaluer l'impact d'expositions prolongées à la pollution atmosphérique sur l'incidence des maladies chroniques chez les animaux.

L'air contaminé par les fluorures a été souvent responsable de dommages importants au niveau du bétail. Les fluorures s'adsorbent dans le fourrage et affectent la qualité ainsi que la productivité du cheptel laitier. Le bétail souffre alors d'une calcification anormale des os et des dents associée à une perte de poids: cette maladie s'appelle fluorose. De façon générale, tous les herbivores sauvages ou domestiques peuvent être affectés par les fluorures si la concentration de ces contaminants est excessive. On a même signalé des cas de fluorose chez les abeilles dont les ruches se trouvaient à proximité de sources importantes de fluorures.

D'autre part, l'acidification des lacs par le phénomène des précipitations acides a un impact négatif sur la diversité et la densité de la faune ichtyologique.

4.3 *Les effets sur la végétation*

Les végétaux sont sensibles aux contaminants atmosphériques et leurs réactions varient comme pour les humains et les animaux en fonction de la dose, de la fréquence et de la durée des expositions ainsi que de plusieurs autres facteurs internes ou externes (figure 22). Les facteurs internes sont liés à la génétique et au stade

de développement. Ainsi, la sensibilité à un contaminant varie non seulement entre les espèces, mais aussi entre les individus d'une même espèce. De plus, la sensibilité des plantes est généralement plus grande à des moments spécifiques de développement comme l'éclosion des bourgeons, la pousse des feuilles et la floraison. Les facteurs externes sont d'ordre climatique (ensoleillement, température, humidité), édaphique (nature du sol, de l'eau et fertilité) et biotique (parasites, maladies).

Les effets aigus et chroniques sont visibles. Ils se manifestent le plus souvent sous forme de chlorose (décoloration des feuilles à la suite d'une réduction de la fonction chorophyllienne), de nécrose (destruction des cellules) ou de malformations. Les effets subtils sont invisibles. Ils affectent surtout la croissance, le rendement et la reproduction.

Les stomates, ces orifices minuscules que l'on retrouve sur l'épiderme des feuilles, jouent un rôle essentiel à la respiration et à la transpiration des tissus végétaux. C'est par les stomates que les contaminants gazeux pénètrent dans les organes de la feuille et causent des dommages à la végétation. D'autre part, les particules accumulées à la surface du feuillage peuvent affecter le fonctionnement des stomates et la photosynthèse.

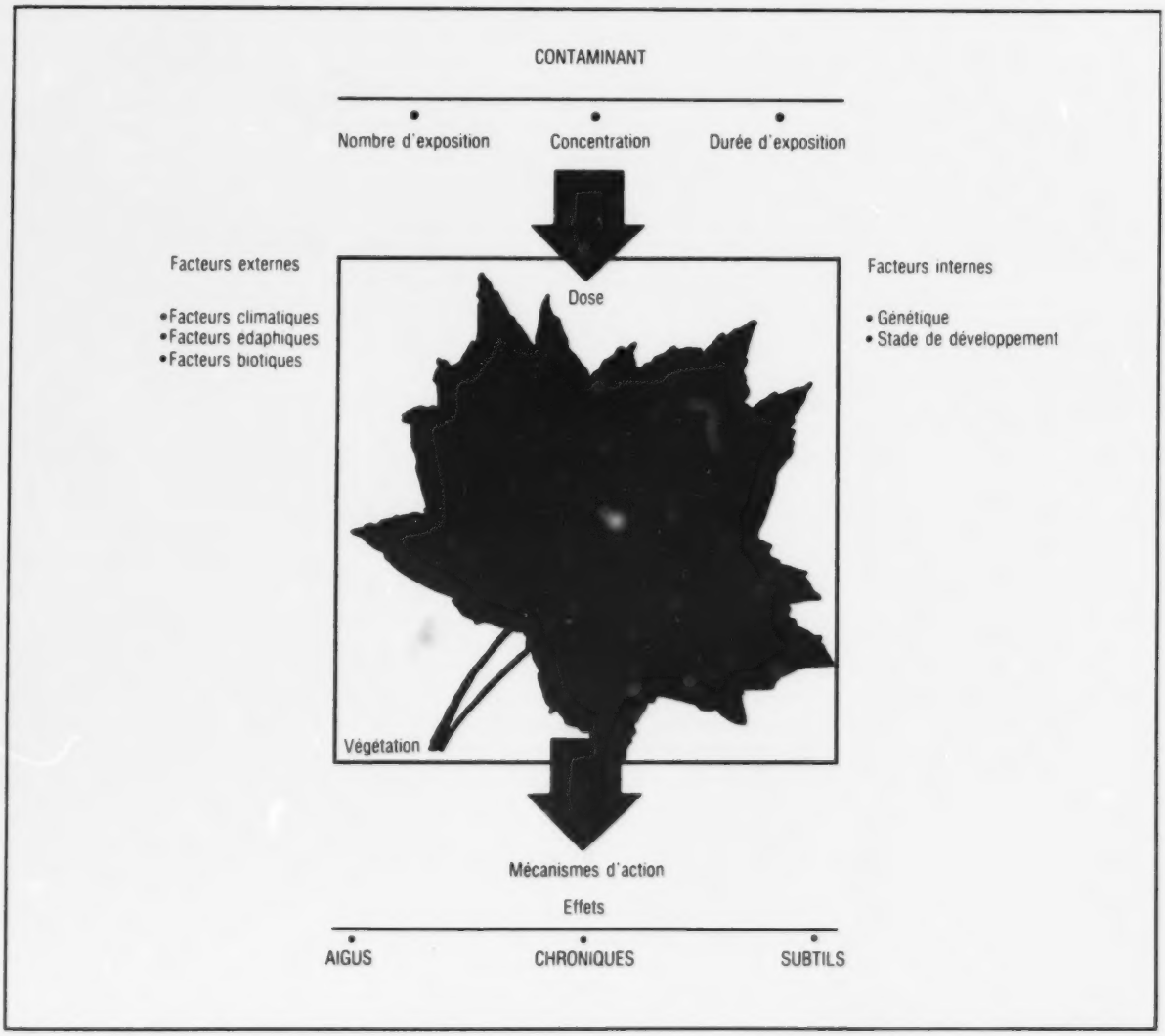


FIGURE 22 — **Effets des contaminants atmosphériques sur la végétation et autres facteurs impliqués**

Le dioxyde de soufre, le fluorure d'hydrogène et les oxydants sont les contaminants qui sont le plus souvent en cause. Le tableau 6 dresse une liste abrégée d'espèces sensibles au dioxyde de soufre et au fluorure d'hydrogène. Parmi les plantes les plus sensibles, on retrouve la laitue, le tabac, la tomate, la fève soya, l'avoine, la pomme de terre, le pin blanc et le frêne d'Amérique.

Le dépérissement des forêts que l'on observe depuis quelques années en Europe et en Amérique est associé, tout au moins en partie, aux précipitations acides et à d'autres formes de contamination atmosphérique. Quoique encore mal connus, leurs effets sur la végétation pourraient être causés directement par le contact de la pluie, ou indirectement par la modification de l'équilibre des sols provoquée par la perte des éléments nutritifs ou l'augmentation des métaux lourds.

Certaines plantes, surtout les mousses et les lichens, servent fréquemment d'indicateur biologique de la pollution de l'air dans les milieux urbains à cause de leur sensibilité reconnue au dioxyde de soufre et aux particules.

TABLEAU 6 — **Liste abrégée de quelques espèces végétales sensibles au dioxyde de soufre et au fluorure d'hydrogène**

DIOXYDE DE SOUFRE (SO_2)		FLUORURE D'HYDROGÈNE (HF)	
Plantes fourragères et céréalières			
avoine	orge	luzerne	
blé	seigle	orge	
luzerne	soya	maïs	
mélilot	trèfle	trèfle	
Plantes potagères			
betterave	épinard	carotte	framboisier
brocoli	haricot	épinard	laitue
carotte	laitue	fraisier	rhubarbe
chou de Bruxelles	navet		
citrouille	radis		
courge	rhubarbe		
Fleurs de jardin			
aster	violette	azalée	pétunia
pois de senteur	zinnia	glaïeul	tulipe
		iris	
Plantes indigènes			
amaranthe	renouée liseron	bleuet	mélilot
érigeron du Canada	rumex crépu	céraiste	quenouille
plantain		digitaire	verge d'or
Arbres			
bouleau	peuplier de Lombardie	épinette bleue	peuplier faux-tremble
mélèze	pin blanc	érable argentée	pin blanc
orme d'Amérique	pommier	érable negundo	pin mugho
		mélèze	

4.4 *Les effets sur les matériaux*

Si l'humidité, la température, le rayonnement solaire et le processus de gel et de dégel ont une action directe sur la dégradation des matériaux (façades, toitures, peintures, etc.), plusieurs contaminants y jouent un rôle non négligeable. Les contaminants atmosphériques peuvent endommager les biens matériels de diverses façons:

- abrasion
  Les grosses particules solides peuvent avoir une action abrasive sur les matériaux lorsqu'elles voyagent dans l'air à une grande vitesse.

- attaque chimique directe
  Plusieurs contaminants peuvent réagir directement sur les matériaux et les détériorer. Prenons comme exemple le décapage des surfaces métalliques par les brouillards acides.
- attaque chimique indirecte
  Certains matériaux adsorbent les contaminants et sont endommagés lorsque ceux-ci subissent une transformation chimique. Le dioxyde de soufre adsorbé par le cuir est transformé en acide sulfurique, lequel détériore le cuir.
- corrosion électrochimique
  La plupart des dommages aux matériaux ferreux sont causés par ce processus. La différence de potentiel entre des cellules positives ou négatives est la force qui régit l'action corrosive. Celle-ci est absente lorsque la surface est propre et sèche. Par contre, la corrosion surviendra lorsque la surface sera humide et contaminée, la conductivité électrique étant activée.

Les dommages causés par la pollution atmosphérique à divers matériaux sont indiqués au tableau 7.

Pour donner une idée de l'ampleur que peuvent prendre ces problèmes, il suffit de mentionner qu'à Athènes, la frise du Parthénon a subi davantage de détériorations causées par la pollution des 100 dernières années qu'au cours des deux premiers millénaires de son existence. Les oxydes de soufre réagissent sur le calcaire ($CaCO_3$) en présence d'humidité et forment du sulfate de calcium ($CaSO_4$) et du gypse (sulfate de calcium hydraté), lesquels sont solubles dans l'eau.

TABLEAU 7 — **Dommages causés par la pollution atmosphérique à divers matériaux**

MATÉRIAUX	TYPE DE DOMMAGE	PRINCIPAUX CONTAMINANTS	AUTRES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX
Métaux	**Détérioration des surfaces, corrosion, ternissure**	**SO_2, gaz acides**	**Humidité, température**
Matériaux des édifices	Décoloration, dissolution	SO_2, gaz acides, particules adhérentes	Humidité, gel
Peinture	**Décoloration**	**SO_2, H_2S, particules adhérentes**	**Humidité, fungus**
Cuir	Affaiblissement des surfaces	SO_2, gaz acides	Usure
Papier	**Friabilité**	**SO_2, gaz acides**	**Ensoleillement**
Textiles	Réduction de l'extensibilité, souillure	SO_2, gaz acides	Humidité, ensoleillement, fungus
Teinture	**Atténuation**	**NO_2, oxydants, SO_2**	**Ensoleillement, humidité**
Caoutchouc	Fendillement	Ozone et autres oxydants	Ensoleillement
Céramique	**Changement d'apparence de l'émail**	**HF, gaz acides**	**Humidité**
Verre	Perte de transparence	HF, gaz acides	Humidité

D'après J.E. Yocom et J.B. Upham, 1976, dans AIR POLLUTION (édité par A.C. Stern).

Plusieurs études portant sur les effets de la pollution atmosphérique et des précipitations acides sur les biens matériels, notamment les édifices et les monuments historiques, ont été effectuées à travers le monde. Des tests ont montré que l'exposition de divers matériaux à des solutions acides dont le pH est similaire à ceux mesurés dans les précipitations des régions les plus touchées provoquent des dommages apparents sur les métaux (corrosion) et les pierres à base de calcaire (dissolution). Toutefois, la part de responsabilité entre les précipitations acides et d'autres facteurs comme l'érosion due au chlorure de calcium (CaCl) reste encore à établir.

4.5 *Les effets sur le milieu atmosphérique*

La visibilité définit la transparence de l'air. Les matières particulaires et les contaminants gazeux réduisent la visibilité. Les petites particules dispersent la lumière tandis que certains gaz en absorbent une partie. Citons en exemple le dioxyde d'azote. Il existe aussi une relation étroite entre la visibilité et la concentration des particules en suspension. La réduction de la visibilité est, parmi les effets de la pollution atmosphérique, celui qui est perçu le plus largement par la population. Ce problème contribue à diminuer chez l'homme la sensation de bien-être.

La pollution atmosphérique affecte aussi la formation des nuages et des brouillards, les précipitations de même que l'ensoleillement de la surface terrestre. Entre autres, le climat urbain est largement affecté par la modification de ces facteurs météorologiques.

À l'échelle de la biosphère, le cycle du dioxyde de carbone (CO_2), constituant normal de l'air, serait altéré par les 13 milliards de tonnes de ce gaz libérées annuellement par les sources de combustion. En effet, grâce à ses propriétés, le CO_2 agit comme la vitre d'une serre, laissant les rayons chauds du soleil atteindre le sol mais piégeant par la suite la chaleur radiante près du sol. Conséquemment, plusieurs scientifiques prédisent que l'augmentation prévue de la concentration atmosphérique de CO_2 d'ici l'an 2050 provoquera un réchauffement mondial de l'ordre de 3 °C. Les conséquences d'un tel réchauffement pourraient entraîner d'importantes modifications au niveau de la production alimentaire mondiale, de la forêt boréale et de la disponibilité en eau. Par contre, une augmentation des nuages et de la concentration de particules en suspension dans l'atmosphère diminuerait le rayonnement solaire, ce qui pourrait causer un refroidissement de l'atmosphère, pouvant ainsi atténuer et possiblement contrebalancer l'effet de serre. Advenant un conflit nucléaire, l'émission d'une immense quantité de particules dans l'atmosphère provoquerait un abaissement sensible de la température mondiale. Cette alarmante perspective est appelée couramment l'hiver nucléaire.

Les connaissances actuelles relatives aux effets de la pollution atmosphérique montrent que nous ne devons pas nous préoccuper uniquement de l'action destructive locale des polluants en fortes concentrations, mais que nous devons aussi prendre en considération les effets écologiques, dans leur ensemble, des contaminants omniprésents comme le CO_2 et les particules fines.

4.6 *Les aspects socio-économiques*

Il n'y a que peu de données relatives aux coûts et aux pertes économiques enregistrés à cause de la pollution atmosphérique. Les atteintes à la santé humaine se traduisent par des coûts qui ne peuvent pratiquement pas être chiffrés. Il en est de même pour les effets subtils sur la végétation. D'autres types de dommages ont davantage fait l'objet d'évaluations, dont, entre autres, les dommages aux matériaux, la diminution du rendement des récoltes et des cheptels. Pour donner une idée de l'ordre de grandeur des coûts liés à la pollution atmosphérique, on estimait aux États-Unis, vers le début des années 1970, à plus de 100 milliards de dollars les pertes économiques découlant des dommages causés aux matériaux seulement. À combien de milliards de dollars se chiffreront donc demain les pertes économiques pro-

voquées par le dépérissement des forêts d'Europe et d'Amérique du Nord? Dans cette perspective, si la lutte à la pollution atmosphérique coûte apparemment très cher, il semble bien que celle-ci risque de coûter beaucoup plus cher encore.

CHAPITRE 5

LA MESURE ET L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE L'ATMOSPHÈRE

5. La mesure et l'évaluation de la qualité de l'atmosphère

Afin de résoudre les problèmes de pollution atmosphérique, il faut d'abord connaître, de la façon la plus adéquate possible, la nature et la concentration des contaminants émis ou présents dans l'atmosphère. La détermination de la concentration des contaminants dans l'atmosphère exige le prélèvement d'échantillons d'air les plus représentatifs possible de l'atmosphère que l'on désire connaître. Les mesures peuvent être effectuées «in situ» dans l'air ambiant ou à la source d'émission des contaminants. D'autres mesures peuvent être prises à distance.

Il est également possible d'évaluer la qualité de l'air à partir de divers modèles mathématiques basés sur les paramètres relatifs à l'émission des contaminants, sur les paramètres météorologiques et sur les mécanismes d'élimination des contaminants (dépôt et transformation chimique).

5.1 La mesure des contaminants à l'émission

Les contaminants à l'émission sont en général connus; ils sont présents à des concentrations relativement élevées. L'échantillonnage est le plus souvent pratiqué dans un conduit d'évacuation des gaz. Pour être représentatifs, les échantillons de particules doivent être prélevés dans des conditions voisines de l'isocinétisme. L'isocinétisme signifie que la vitesse de prélèvement est semblable à la vitesse d'évacuation des gaz. Une vitesse d'échantillonnage supérieure à la vitesse du flux gazeux provoque une sous-estimation de la quantité de particules. À l'opposé, une vitesse d'échantillonnage inférieure à la vitesse du flux gazeux provoque une surestimation de la quantité de particules. L'isocinétisme est d'autant plus important que la taille des particules est importante. Pour les gaz et les particules fines qui se comportent comme des gaz, c'est-à-dire les particules dont le diamètre est inférieur à un μm, l'isocinétisme n'est pas une condition nécessaire pour les échantillonnages à la source.

Les résultats peuvent être évalués par rapport aux conditions de fonctionnement d'un procédé de production ou de combustion et ils peuvent, par la suite, être comparés aux normes d'émission des divers contaminants atmosphériques établies pour plusieurs de ces procédés.

Ces mesures servent à calculer les émissions d'un procédé industriel ou de combustion, à vérifier l'efficacité des équipements d'épuration et à s'assurer que les quantités émises rencontrent les normes d'émission établies pour divers types de procédés.

5.2 La mesure des contaminants dans l'atmosphère

Les mesures prélevées dans l'air ambiant sont généralement aussi difficiles à effectuer qu'à interpréter. En effet, les concentrations des contaminants sont généralement beaucoup plus faibles qu'à l'émission, tout au moins dans le cas des sources uniques. De plus, elles sont affectées par de nombreux facteurs météorologiques (vitesse et direction des vents, gradients de température...), par les fluctuations des sources émettrices, par l'interaction des contaminants dans l'atmosphère qui rendent encore plus complexes et difficiles la mesure de la pollution atmosphérique et l'interprétation des résultats. Les méthodes de mesure décrites ici ne représentent pas une liste exhaustive. Nous nous limitons surtout à la description des méthodes les plus couramment employées en Amérique du Nord.

5.2.1 *Les particules*

Les échantillons des particules en suspension totales se prélèvent sur un filtre à l'aide d'un échantillonneur à grand débit. L'appareil aspire l'air à un débit d'environ 1,5 mètre cube d'air par minute à travers le filtre qui est pesé avant et après son exposition. La période d'échantillonnage est de 24 heures, s'étalant de minuit à minuit, et la concentration des particules en suspension dans l'air est exprimée en microgrammes par mètre cube ($\mu g/m^3$). Les échantillons sont prélevés généralement à tous les six jours. Ce type d'équipement est largement employé au Canada et aux États-Unis. Des appareils similaires permettent d'échantillonner les particules dont le diamètre est inférieur à 10μm. Il existe aussi des échantillonneurs à faible débit (0,04 m^3/mn) qui subdivisent en deux fractions les particules respirables. La première représente la quantité de particules pouvant se déposer dans la partie supérieure du système respiratoire (particules dont le diamètre est compris entre 2,5 μm et 10 μm). La seconde détermine la quantité de particules pouvant atteindre les alvéoles pulmonaires (particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm).

Dans plusieurs pays européens, on utilise plutôt la mesure de l'indice de souillure ou la mesure de fumée. Les deux mesures sont analogues mais le débit d'air de la première est légèrement plus élevé que la seconde. L'air est aspiré à travers un ruban de papier-filtre et les particules en suspension dans l'air se déposent sur le filtre, produisant une tache circulaire. À intervalle régulier, le ruban avance de quelques centimètres et une nouvelle tache est formée. L'opacité de ces taches est évaluée au moyen d'un photomètre et les résultats sont exprimés en unités COH (coefficient of haze) pour l'indice de souillure et en microgrammes par mètre cube ($\mu g/m^3$) pour la mesure de fumée. Les faibles débits de ces appareils permettent d'échantillonner à l'intérieur de la gamme des particules respirables.

Les plus grosses particules, celles qui, le plus rapidement, forment un sédiment au sol, sont captées dans des récipients cylindriques de dimensions déterminées. Ces récipients sont exposés à l'air libre durant une période de 30 jours. Les particules plus grandes que 1,6 millimètre sont rejetées avant de déterminer le poids total des matières recueillies. Les résultats sont exprimés en tonnes métriques par kilomètre carré par 30 jours (t/km^2/30 jours) et sont désignés sous le nom de retombées de poussières.

À partir des échantillons de particules, il est possible d'obtenir, en plus de leur masse, la proportion de divers métaux ou composés chimiques (plomb, fer, zinc, magnésium, manganèse, sulfates, nitrates, hydrocarbures aromatiques polycycliques).

5.2.2 *Les contaminants gazeux*

L'échantillonnage des contaminants gazeux s'effectue la plupart du temps de façon continue, c'est-à-dire que les appareils donnent des mesures instantanées de concentration de pollution qui sont enregistrées sur papier graphique ou transmises directement au centre de collecte des données par télémesure. Afin de s'assurer de l'exactitude des résultats obtenus, il est nécessaire de procéder à un étalonnage rigoureux des échantillonneurs. Dans le cas des contaminants gazeux, l'étalonnage consiste à introduire dans l'appareil une quantité connue du gaz que l'on veut échantillonner afin de s'assurer que la réponse de l'appareil correspond bien à cette quantité connue de gaz.

Les méthodologies d'échantillonnage varient selon les contaminants. En voici quelques-unes. Une des méthodes employées pour la mesure du SO_2 est la coulométrie. L'air contaminé est aspiré à travers un barboteur rempli d'une solution de brome. La conductivité électrique de l'électrolyte est modifiée par réaction chimique: celle-ci varie en proportion directe avec la quantité de SO_2. Une autre méthode, de plus en plus répandue, est basée sur le principe de l'excitation par les rayons ultraviolets de la molécule de SO_2. La fluorescence qui en résulte est proportionnelle à la concentration.

L'ozone et le dioxyde d'azote sont mesurés à l'aide de la méthode de la chimiluminescence qui consiste en une détection photométrique de la réaction entre les gaz échantillonnés et des gaz réactifs (éthylène dans le cas de l'ozone et ozone dans le cas du dioxyde d'azote). Le monoxyde de carbone est détecté grâce à sa propriété d'absortion des rayons infrarouges.

Il est également possible d'échantillonner les contaminants atmosphériques, de façon ponctuelle, à l'aide d'appareils portatifs. Parmi les appareils les plus simples, l'appareil Draeger permet d'aspirer à l'aide d'une pompe à main une certaine quantité d'air à travers un tube de verre transparent contenant une matière adsorbante et un réactif propre au gaz échantillonné. L'évaluation de la concentration du contaminant s'effectue en observant la variation de la coloration à l'intérieur du tube.

5.2.3 *Les odeurs*

La mesure des odeurs est excessivement délicate à cause des particularités de l'odorat décrites précédemment. L'utilisation de la chromatographie en phase gazeuse permet d'identifier les composés pouvant occasionner des problèmes d'odeurs. Cette méthode ne permet malheureusement pas d'évaluer le niveau de perception de ces odeurs par ceux qui la subissent. Une méthode couramment utilisée pour déterminer des seuils d'intensité consiste à diluer des concentrations connues d'un échantillon d'air pollué dans l'air pur. On insuffle au hasard diverses concentrations de l'échantillon à plusieurs expérimentateurs. Cet air est insufflé directement dans une narine de l'expérimentateur à l'aide d'une seringue spéciale. On peut ainsi déterminer le taux de dilution nécessaire pour obtenir le seuil de perception et la concentration correspondante. Les valeurs obtenues sont exprimées en degré d'odeur par mètre cube.

Il existe maintenant des appareils appelés olfactomètres qui permettent la dilution des échantillons jusqu'à leur seuil de perception ou la comparaison des échantillons avec des substances de référence.

5.3 *Les réseaux d'échantillonnage*

Un réseau d'échantillonnage est un moyen utilisé pour déterminer la qualité de l'atmosphère en rapport avec des objectifs comme la connaissance, la surveillance, la prévention des épisodes de pollution et la recherche. Il est rare que ces objectifs puissent être assignés à un même poste faisant partie d'un réseau d'échantillonnage.

- **La connaissance de la qualité de l'atmosphère**
  L'objectif de la connaissance porte essentiellement sur les situations actuelles, les tendances et les niveaux de fond de la pollution atmosphérique. Ce type d'échantillonnage permet d'évaluer la nécessité de mettre en place des programmes d'intervention relatifs aux sources d'émission et d'en évaluer par la suite leur portée. Il permet aussi d'informer la population sur le niveau de qualité de l'air qu'elle respire.
- **La surveillance de la qualité de l'atmosphère**
  Les réseaux d'échantillonnage fournissent l'information relative aux concentrations des contaminants identifiés dans les réglementations, lorsqu'elles existent. Les résultats d'échantillonnage sont comparés par rapport à des normes ou objectifs qui définissent le niveau des concentrations acceptables.
- **La prévention des épisodes de pollution**
  Les données d'échantillonnage, lorsqu'elles sont disponibles instantanément, peuvent être intégrées à un système de contrôle intermittent des sources d'émission afin de prévenir à très court terme les épisodes de pollution atmosphérique.
- **La recherche**
  Finalement, l'étude des relations dose-effet concernant les effets sur la santé, la végétation, les biens matériels et le milieu atmosphérique ainsi que la vali-

dation des divers modèles de pollution de l'air sont les champs d'activités les plus fréquemment reliés à l'objectif de la recherche.

La durée et la fréquence des mesures, la localisation, le niveau de représentativité spatiale, la mobilité de l'échantillonnage de même que la densité du réseau sont autant d'aspects rattachés étroitement aux objectifs poursuivis par l'échantillonnage. Des critères de localisation pour chaque contaminant assurent le niveau désiré de représentativité spatiale en fonction des objectifs d'échantillonnage visés.

En d'autres termes, il s'agit de localiser un site de façon à pouvoir identifier, de façon raisonnable, à l'ensemble d'un espace (intersection, rue, quartier, ville, région...) l'échantillon d'air prélevé à ce site. Ces critères régissent des paramètres comme la hauteur de la sonde, sa distance par rapport à des obstacles (bâtiments ou arbres) et aux voies de circulation. Les sites d'échantillonnage doivent être éloignés le plus possible des sources d'émission susceptibles de fausser la représentativité des résultats d'échantillonnage.

Dans chaque agglomération, la densité des postes est surtout fonction de la variabilité dans l'espace des niveaux de pollution attribuables à chaque contaminant ainsi que de l'importance des populations concernées. Le nombre de postes est évidemment soumis à des contraintes importantes en ce qui a trait aux ressources disponibles.

5.4 *La télédétection de la pollution atmosphérique*

La télédétection de la pollution atmosphérique consiste à mesurer à distance les concentrations de contaminants dans l'atmosphère. Ces mesures peuvent être effectuées depuis le sol.

Le système LIDAR (Light Detection and Ranging), suivant un principe semblable à celui du radar, permet de mesurer soit des particules, soit des gaz. Un lidar émet une impulsion de lumière (généralement un rayon laser) dans l'atmosphère. On analyse l'intensité et le retard du signal réfléchi afin de déterminer l'étendue et la concentration de l'aérosol cible.

Le système COSPEC (Correlation Spectrometer), grâce à l'analyse de la quantité de lumière du ciel absorbée lorsqu'il pointe directement vers le ciel, mesure la quantité de SO_2 ou de NO_2 qui le surplombe, selon le groupe de bandes d'absorption choisi.

Le SODAR (Sound Detection and Ranging) utilisé pour étudier la structure du premier kilomètre de l'atmosphère permet de déterminer la hauteur de mélange.

D'autres mesures peuvent être effectuées depuis l'espace à l'aide de satellites. Des chercheurs se sont récemment servi des données de LANDSAT pour tenter de caractériser les aérosols troposphériques au-dessus des déserts de l'Iran et du Pakistan afin d'estimer le pouvoir atténuateur des poussières sur le bilan radiatif terrestre. D'autres chercheurs ont aussi étudié la diffusion des polluants au-dessus de certains centres industriels de Pologne.

Le domaine de la détection des contaminants atmosphériques a connu ces dernières années une évolution rapide. En effet, les appareils de mesure, toujours plus efficaces et plus fiables, se succèdent à un rythme accéléré. Ces améliorations permettront d'avoir dans un avenir rapproché une connaissance de plus en plus précise de la qualité de l'atmosphère.

5.5 *Les modèles mathématiques*

Le modèle mathématique de la dispersion et du transport des contaminants atmosphériques est fréquemment utilisé afin de répondre à des besoins comme l'évaluation de l'impact de nouvelles sources d'émission sur l'environnement, la détermination de la responsabilité des pollueurs, la planification ou l'amélioration des réseaux de surveillance, la prévention des épisodes de pollution. Les modèles mathémati-

ques permettent dans une certaine mesure de comprendre les relations complexes entre les sources d'émission et les récepteurs. Pour être acceptables, les modèles doivent tenir compte de plusieurs facteurs tels les sources d'émission (nature et volume), les paramètres météorologiques (stabilité atmosphérique, vitesse et direction du vent, mécanismes de dépôt sec ou humide et processus de transformation chimique). Généralement, les modèles ne tiennent pas compte de tous les facteurs en même temps. Ainsi, dans les modèles de dispersion à courte distance, il arrive très souvent que l'on ne fasse pas intervenir les mécanismes de dépôt et les processus de transformation chimique. Pour les modèles de transport à longue distance, la diffusion verticale est un paramètre fréquemment négligé.

Le lecteur intéressé par ce sujet trouvera à l'Annexe 1 la formulation du modèle gaussien de dispersion applicable à une ou des sources ponctuelles d'émission de contaminants gazeux ou de particules fines. Ce modèle suppose toutefois qu'un certain nombre de conditions sont rencontrées: la stabilité atmosphérique est la même dans toute la couche de diffusion, le vent est homogène sur toute la hauteur de la couche, la topographie est régulière, le contaminant est stable (il n'y a pas de transformation chimique, de dépôt ou d'adsorption à la surface sous-jacente) et la source est continue. D'autres modèles de dispersion, aussi complexes les uns que les autres, sont applicables dans les cas d'enfumage de sources étendues ou linéaires, de topographie accidentée, d'émissions instantanées, de transport à longue distance de contaminants atmosphériques, de diffusion urbaine, de contaminants photochimiques réactifs.

D'autres genres de modèles mathématiques, comme le calcul des rétrotrajectoires, permettent d'identifier la provenance des masses d'air affectant la qualité de l'air à un endroit en particulier. On a pu, par exemple, déterminer que les concentrations élevées d'ozone mesurées dans la vallée du Saint-Laurent sont souvent associées à des systèmes météorologiques de haute pression et à des vents du sud et du sud-ouest. Les deux itinéraires les plus fréquents proviennent soit des états de New York et de Pennsylvanie, soit du sud de l'Ontario, des états de l'Ohio, du Michigan, de l'Indiana et de l'Illinois.

Les modèles sources-récepteurs sont un autre type de modèles mathématiques qui suscitent un intérêt croissant de la part des chercheurs. Ils permettent d'établir la contribution relative des diverses sources d'émission à partir des échantillons prélevés dans des postes d'échantillonnage. La composition élémentaire des matières particulaires contient en effet une abondante information sur leur provenance. Cette approche est maintenant possible à cause des améliorations récentes des méthodes d'analyse des particules.

CHAPITRE 6

LA PRÉVENTION DES PROBLÈMES DE POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

6. *La prévention des problèmes de pollution atmosphérique*

Pour restreindre les problèmes locaux de pollution, on s'est longtemps contenté de hausser la hauteur des cheminées. Par contre, on sait maintenant que cette façon de disperser les effluents a largement contribué à des problèmes comme celui des précipitations acides, étant donné la plus grande quantité de contaminants disponibles pour le transport à longue distance.

Dans le domaine de la pollution de l'air, les mesures correctives sur les milieux récepteurs sont la plupart du temps très limitées. Ces mesures, généralement coûteuses, ne sont employées que si l'on estime que les biens attaqués sont assez précieux. Dans certains cas, elles doivent de plus être répétées fréquemment tant que le niveau de pollution reste élevé. Il sera possible, par exemple, de protéger de la corrosion certaines structures en les enduisant de produits anticorrosifs, de favoriser l'utilisation d'espèces résistantes pour remplacer la végétation sensible à la pollution atmosphérique ou de chauler les lacs et les sols acidifiés par les précipitations.

La prévention des problèmes de pollution atmosphérique demeure essentiellement le principal type d'intervention que l'homme puisse exercer sur ses activités polluantes. Les moyens de prévention se répartissent en cinq groupes: l'action à la source, le traitement des émissions atmosphériques, la planification des nouvelles sources d'émission, les systèmes de contrôle intermittent, l'information et l'éducation.

6.1 *L'action à la source*

L'attitude la plus rationnelle à adopter consiste à prévenir la formation des contaminants à leur source. Les actions à la source peuvent s'exercer de quatre façons. Le premier type d'action à envisager consiste à optimiser les conditions d'opération d'un procédé industriel ou d'un processus de combustion. Le fonctionnement d'un incinérateur sous des conditions de température, de rétention et de turbulence des gaz suffisantes pour assurer une combustion complète des déchets constitue un exemple de procédé dont les conditions de fonctionnement ont une influence importante sur les émissions atmosphériques. De la même façon, l'entretien régulier des véhicules automobiles (moteur et convertisseur catalytique) et leur conduite optimale permettent de diminuer de façon significative la pollution qu'ils génèrent.

Le remplacement d'une source d'énergie polluante par une autre qui l'est moins constitue un second type d'action qui favorise la diminution, voire l'élimination des émissions. Le tableau 8 permet de comparer les taux d'émission des principaux contaminants pour différents combustibles. Au niveau industriel, le remplacement d'un combustible à haute teneur en soufre par un autre dont la teneur est plus basse permet d'atténuer les problèmes de pollution. Au niveau domestique, la conversion des systèmes de chauffage au mazout par des systèmes électriques, au gaz ou biénergétiques contribue à améliorer la qualité de l'atmosphère de nos villes.

L'amélioration des procédés de fabrication, comme l'utilisation d'un mordant très peu volatil comme couverture du bain de zinc liquide dans un four de galvanisation ou l'addition de lithium dans le procédé de l'électrolyse de l'alumine, représente un troisième type d'action qui concourt à la diminution des émissions atmosphériques.

Le dernier type d'action consiste à modifier de façon radicale les équipements impliqués. Prenons comme exemple un cubilot utilisé dans les fonderies que l'on remplace par un four électrique chauffé par induction. Cette modification entraîne une réduction du taux d'émission de 8,5 kilogrammes de particules par tonne de fonte produite pour un cubilot à 0,75 kilogramme de particules par tonne pour un four électrique à induction.

TABLEAU 8 — **Taux d'émission de différentes sources énergétiques (en kilogramme par tonne)**

COMBUSTIBLES	CONTAMINANTS				
	Particules	Dioxyde de soufre	Dioxyde d'azote	Hydrocarbures	Monoxyde de carbone
Charbon	10,4-19,5	11,4-133,0	7,5	0,5	1,0
Bois	10,0	négligeable	0,5	35,0	60,0
Mazout lourd	3,0-3,7	45,0-50,0	11,3	0,1	0,6
Mazout léger	0,2-0,3	6,0-10,0	3,3	0,1	0,7
Gaz naturel	0,1-0,4	0,01	4,3	0,1	0,4
Hydro-électricité	0	0	0	0	0

6.2 *L'épuration des effluents atmosphériques*

L'action à la source est rarement suffisante. Il est très souvent nécessaire de traiter les effluents gazeux afin d'en éliminer les particules et les gaz nocifs qu'ils contiennent. Pour les procédés industriels, de nombreux équipements ont été conçus à cet effet. Ceux-ci ont des rendements d'épuration très différents; de plus, l'investissement et le coût d'exploitation varient considérablement selon le type d'appareil ou d'équipement choisi. Chaque problème de traitement constitue donc un cas spécifique.

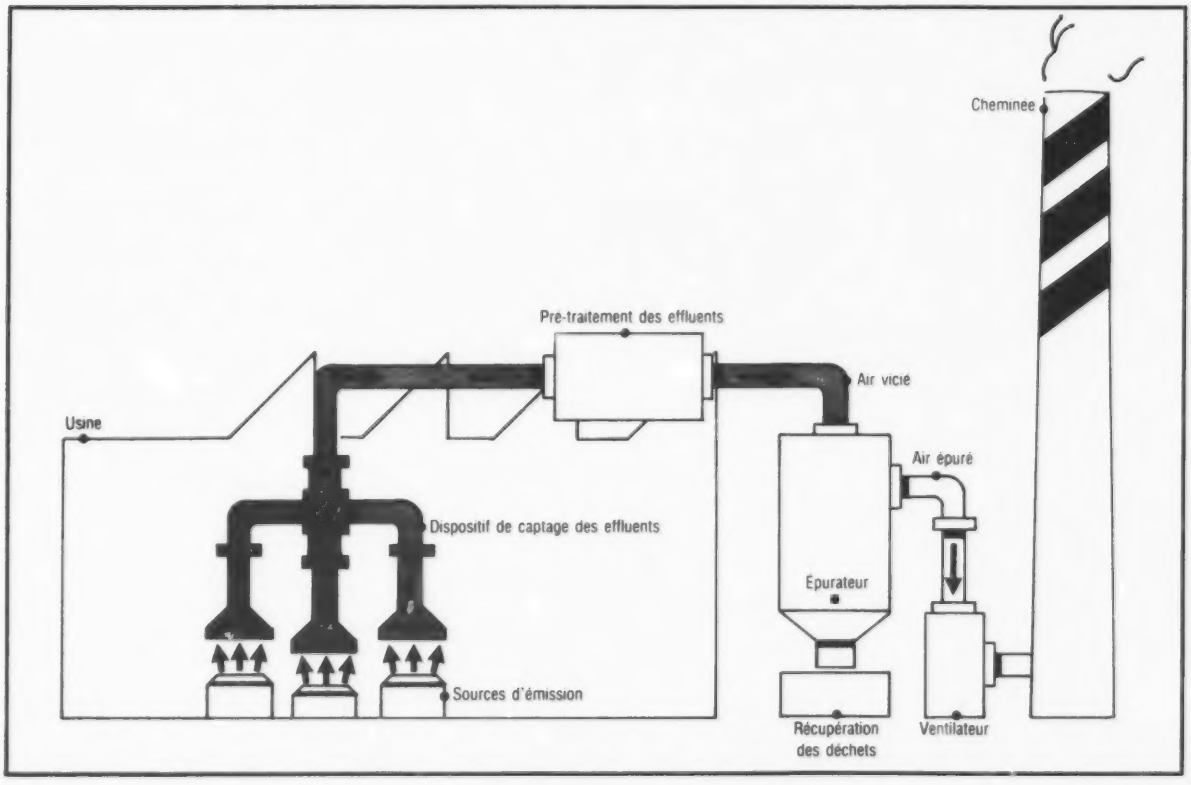


FIGURE 23 — **Schéma général du processus d'épuration des effluents**

Les principes suivants s'appliquent à tous les épurateurs d'air. Ceux-ci enlèvent de façon continue les particules et les gaz nocifs d'un effluent gazeux en mouvement. La succession générale du processus d'épuration est montrée à la figure 23.

Les effluents sont captés à leur source par un dispositif de captage, prétraités si nécessaire et acheminés jusqu'à l'équipement d'épuration. L'air épuré est par la suite rejeté dans l'atmosphère par une cheminée ou un conduit d'évacuation. Il est à noter que le ventilateur permettant l'aspiration des effluents est généralement placé après l'épurateur, afin de le protéger contre l'abrasion et les éventuels déséquilibres dus aux particules entraînées.

Les principaux types d'épurateurs industriels se répartissent en deux groupes: les épurateurs de particules et les épurateurs à gaz. Le tableau 9 résume les principales caractéristiques de ces épurateurs.

6.2.1 *Les épurateurs de particules*

Les particules fines étant plus difficiles à éliminer que les grosses, leur proportion aura une incidence prépondérante sur le rendement d'élimination. La dimension des particules émises est, par conséquent, un facteur important dans le choix du type d'épurateur nécessaire pour atteindre l'efficacité recherchée. Il y a bien sûr d'autres facteurs qui se rattachent aux caractéristiques des contaminants particulaires (concentrations moyennes et extrêmes, densité, humidité, composition chimique...) ou à celles du fluide porteur (débit, pression, température...). Le choix du type d'épura-

TABLEAU 9 — **Principales caractéristiques des divers types d'épurateurs**

TYPES D'ÉPURATEURS	Taille[1] optimale de particules (en µm)	Efficacité d'épuration[2] en pourcentage	Encombrement[3]	Résidu[4]
PARTICULES				
Dépoussiéreurs mécaniques				
• Chambre de sédimentation	> 50	< 50	G	S
• Séparateurs centrifuges (cyclones)	5 - 25	50 à 90	M	S
Dépoussiéreurs hydrauliques				
• Tours à pulvérisation	25	< 80	G	L
• Laveurs cyclone	5	< 80	G	L
• Laveurs Venturi	< 1	< 99	F	L
Dépoussiéreurs à filtres	< 1	> 99	G	S
Dépoussiéreurs électrostatiques	< 1	95 à 99	G	S - L
GAZ				
Laveurs à gaz	–	> 90	M-G	L
Adsorbeurs à gaz	–	> 97	G	S - L
Incinération directe	–	> 98	M	–
Incinération catalytique	–	> 98	G	–

D'après R. Ross, 1972, La pollution atmosphérique et l'industrie.

1. Taille minimale des particules pouvant être piégées avec une efficacité supérieure à 90 pour cent.
2. Calculée par rapport à la masse totale des particules ou des gaz entrant dans l'épurateur.
3. G: grand, M: moyen, F: faible.
4. S: solide, L: liquide.

teur doit aussi tenir compte du rendement d'épuration attendu, de la continuité ou de l'intermittence de son fonctionnement, des méthodes d'élimination ou de récupération des matières prélevées, de l'espace disponible pour son installation, de la sécurité de fonctionnement, des coûts d'investissements et d'exploitation. La figure 24 montre des courbes d'efficacité pour quelques épurateurs de particules. L'efficacité d'épuration est exprimée en pourcentage et se mesure de la façon suivante:

$$E.E. = \frac{Q_e - Q_s}{Q_e} \times 100$$

E.E. = efficacité d'épuration (en pourcentage)
Q_e = concentration des contaminants à l'entrée
Q_s = concentration des contaminants à la sortie

Les dépoussiéreurs sont généralement classés en fonction du type de force qui sépare les particules du fluide porteur. On distingue ainsi les dépoussiéreurs mécaniques, les dépoussiéreurs hydrauliques, les dépoussiéreurs à filtres et les dépoussiéreurs électrostatiques.

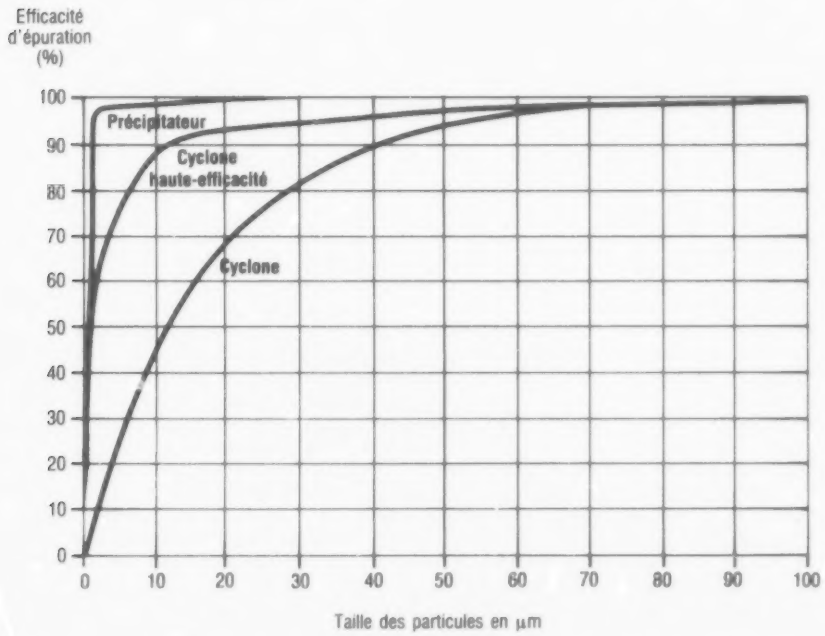


FIGURE 24 — **Diamètre optimum des particules retenues par certains épurateurs**

Les dépoussiéreurs mécaniques

Les dépoussiéreurs mécaniques utilisent la force de gravitation (chambre de sédimentation), la force d'inertie (dépoussiéreurs à inertie) ou une combinaison de la force centrifuge et de la force de gravitation (séparateur centrifuge ou cyclone). Les séparateurs centrifuges sont les dépoussiéreurs mécaniques les plus répandus. Les plus efficaces ont une efficacité d'épuration pouvant atteindre de 80 à 95 pour cent pour les particules supérieures à 5µm. La figure 25 schématise le fonctionnement de ce type d'équipement. Le cyclone transforme la vitesse des effluents en un tourbillon extérieur descendant et un tourbillon intérieur ascendant. Les particules les plus lourdes sont projetées contre la paroi du cyclone par la force centrifuge tandis que l'air épuré est rejeté vers le haut par un tube cylindrique intérieur coaxial au corps du cyclone. Les particules tombent dans une trémie d'où elles sont régulièrement extraites.

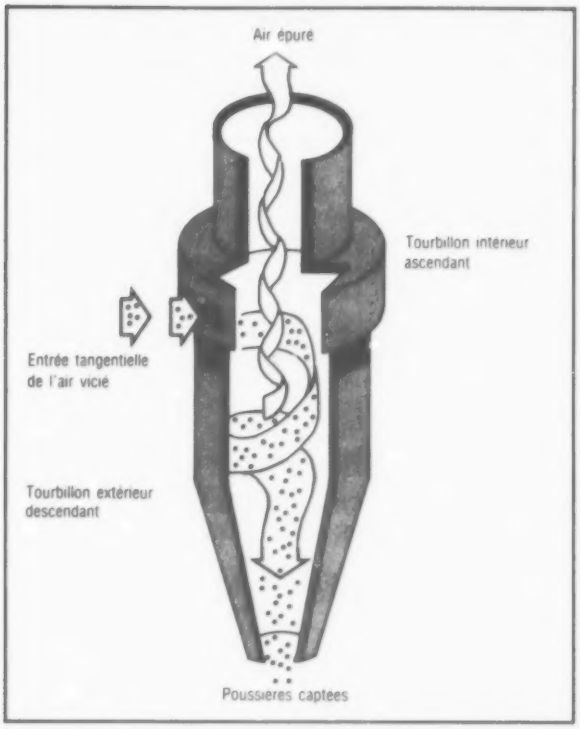


FIGURE 25 — **Dépoussiéreur à force centrifuge (cyclone)**

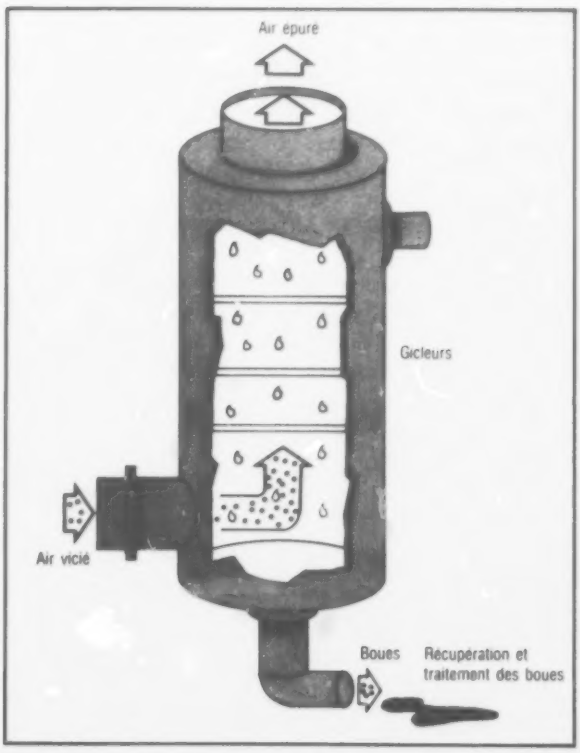


FIGURE 26 — **Dépoussiéreur hydraulique (laveur à gravité)**

Les dépoussiéreurs hydrauliques

Le principe d'épuration des divers genres de dépcussiéreurs hydrauliques consiste à capturer les particules au moyen de gouttelettes d'eau (figure 26). Les particules deviennent ainsi plus grosses et plus lourdes et se séparent du fluide gazeux par gravité, inertie ou force centrifuge. Les particules sont recueillies sous forme de boue, ce qui pose l'inévitable problème de leur traitement. Les dépoussiéreurs hydrauliques sont surtout efficaces pour les grosses particules mais certains épurateurs, comme les laveurs Venturi, atteignent une efficacité d'épuration de l'ordre de 98 à 99 pour cent pour l'ensemble des particules.

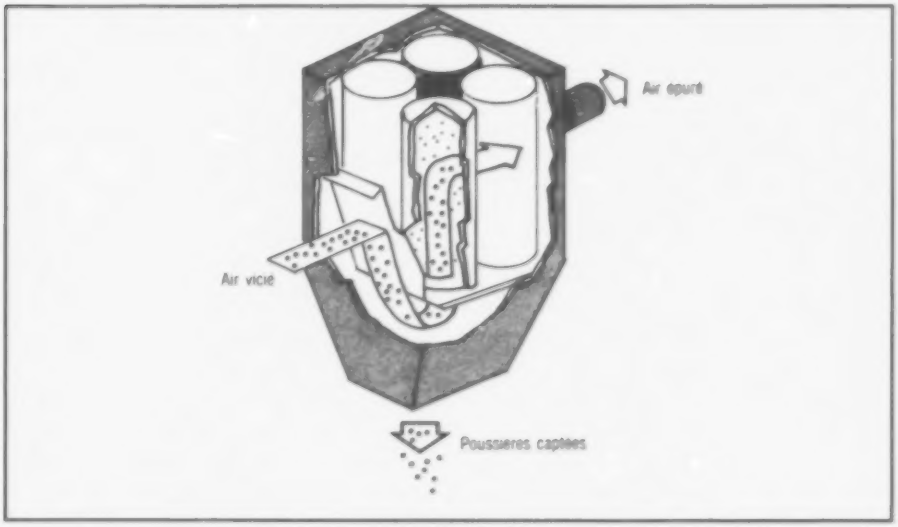


FIGURE 27 — **Dépoussiéreur à filtres (sacs filtrants)**

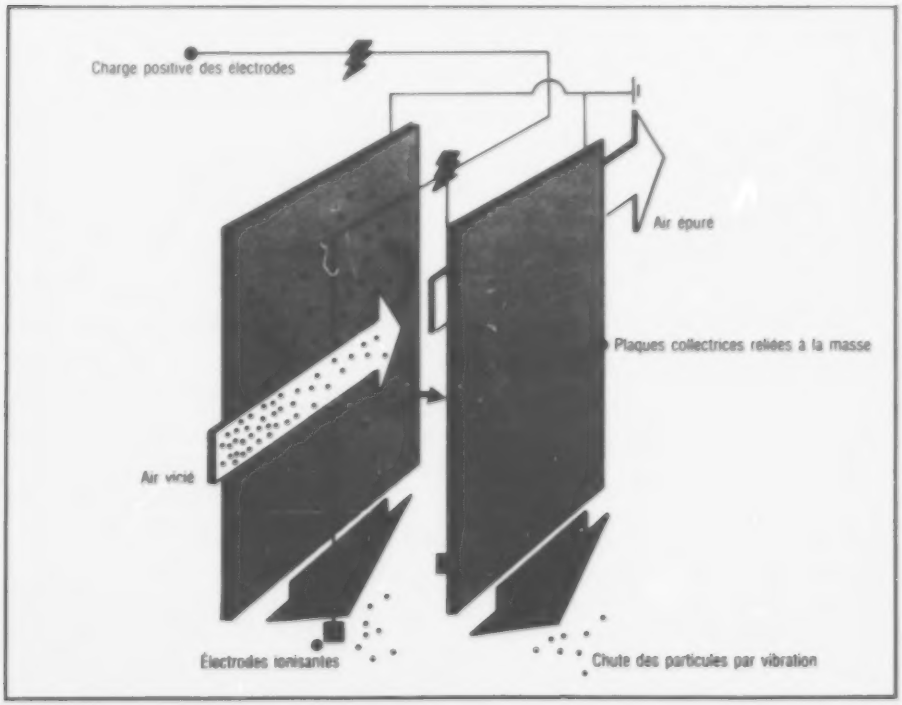


FIGURE 28 — **Dépoussiéreur électrostatique**

Les dépoussiéreurs à filtres

L'air chargé de particules traverse un filtre fabriqué de tissu naturel ou synthétique. Les particules se déposent sur la face du filtre qui est en contact avec l'air pollué (figure 27). L'efficacité d'épuration de certains dépoussiéreurs à filtres peut atteindre 98 pour cent. Ces dépoussiéreurs sont capables d'intercepter des particules aussi petites que 0,5 μm, malgré que les orifices du filtre atteignent parfois 100 μm. L'efficacité de ce genre d'épurateur s'explique par la formation sur le filtre d'une couche de particules appelée «gâteau» qui favorise le piégeage des particules fines. Un dispositif de nettoyage des manches (secouage mécanique, jet d'air pulsé ou flux d'air à contre-courant) permet de recueillir les particules dans une trémie.

Les dépoussiéreurs électrostatiques ou électrofiltres

Les particules sont éliminées du flux d'air vicié à la suite de leur chargement à un potentiel négatif, de leur précipitation sur des électrodes positives, puis de la chute des particules agglomérées dans une trémie (figure 28). La charge des particules s'effectue lorsque l'effluent gazeux traverse le champ électrique établi entre des électrodes ionisantes et les plaques collectrices. L'efficacité d'épuration peut atteindre 99 pour cent. La résistivité des poussières est une mesure de la résistance d'une couche de poussière au passage d'un courant électrique. Ce facteur peut affecter la performance des électrofiltres.

6.2.2 *Les épurateurs de gaz et d'odeurs*

Il n'est pas toujours suffisant d'éliminer les particules d'un fluide gazeux; le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, les fluorures, les hydrocarbures et de nombreux autres composés gazeux doivent aussi être épurés. Examinons quelques méthodes d'épuration qui varient avec les concentrations et les propriétés physico-chimiques des gaz à traiter.

Épuration par absorption ou réaction chimique

La technique de lavage à l'eau est applicable lorsque la solubilité des substances à absorber est élevée. Cependant, elle générera une solution que l'on devra neutraliser ou traiter avant de la rejeter. Lorsque l'absorbant est un solvant réactif, l'absorption des gaz se fait par réaction chimique. Certains absorbants comme le permanganate de potassium et l'hypochlorite de sodium sont couramment utilisés pour traiter les émissions malodorantes.

Les divers types d'appareils basés sur le principe d'absorption sont conçus de façon à présenter une interface gaz/liquide importante pour favoriser la pénétration des molécules gazeuses dans la phase liquide. Ces appareils sont souvent identiques à ceux employés pour éliminer les particules. Quoique beaucoup moins répandus, il existe aussi des épurateurs par absorption ou réaction chimique en phase solide.

Épuration par adsorption

Par ce processus, les molécules gazeuses se fixent à la surface d'un solide. Quelle que soit la nature de l'adsorbant utilisé, le rapport surface-volume est d'une grande importance puisque la réaction n'a lieu qu'à la surface du matériau. L'adsorbant le plus couramment employé est le charbon activé.

Cet absorbant élimine très efficacement les vapeurs organiques et les odeurs. L'alumine est un autre absorbant quelquefois utilisé pour capter les émissions de fluorures gazeux.

Épuration par absorption et régénération biologique

Plusieurs composés odorants comme les mercaptans, les amines et les aldéhydes sont biodégradables pourvu que le temps de rétention soit assez long pour permettre leur biodégradation. L'épuration par absorption et régénération biologique, appelée aussi biofiltre, consiste à capter les gaz odorants sur un support de tourbe et d'y assurer l'équilibre biologique nécessaire au développement des bactéries qui assurent l'auto-épuration du lit adsorbant (figure 29).

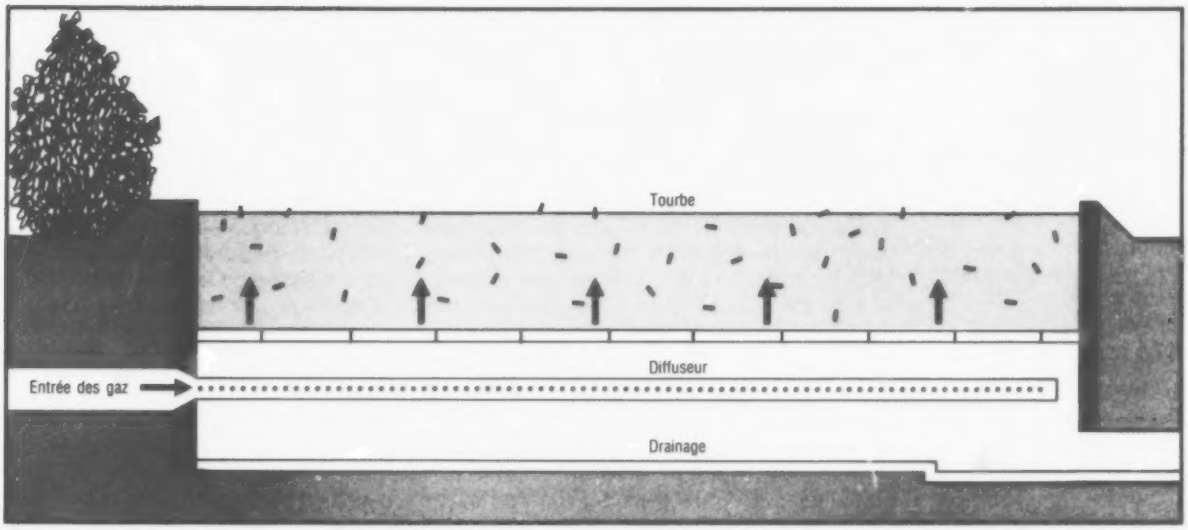


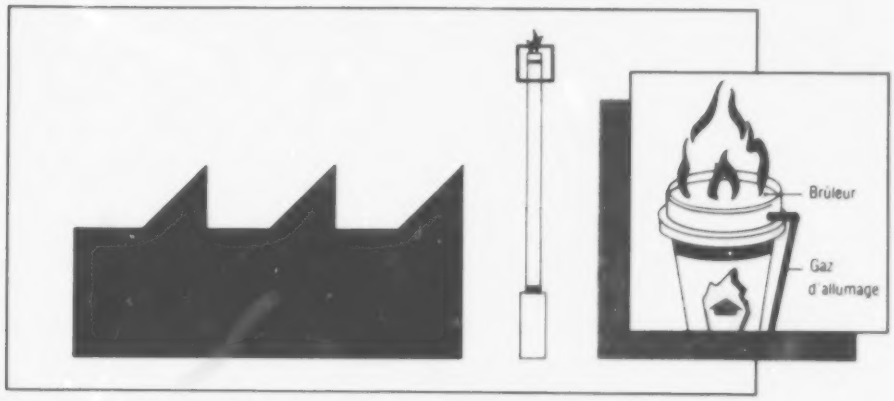
FIGURE 29— **Épuration par adsorption et régénération biologique**

Épuration par combustion

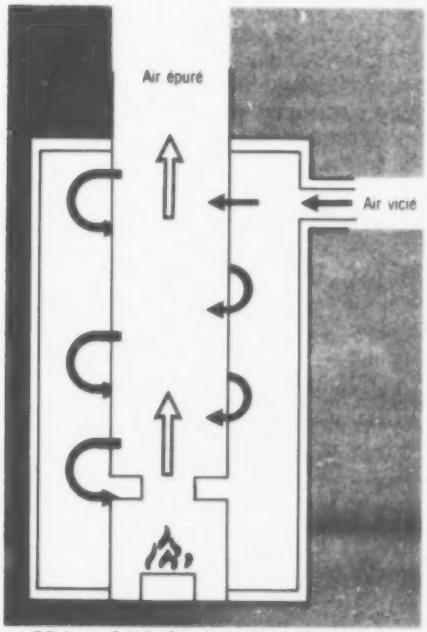
Cette technique est utilisée lorsque les substances à détruire sont oxydables. Quand les contaminants gazeux sont émis à des concentrations supérieures à la limite d'inflammabilité, ils peuvent être brûlés par incinération directe dans une flamme (figure 30 a), soit dans une chambre (brûleur), soit à l'air libre (torche). Les torches sont essentiellement des tuyaux qui rejettent directement dans l'atmosphère un gaz combustible. Elles sont surtout employées pour brûler les gaz résiduaires combustibles que l'on ne peut traiter autrement. Pour être efficaces, ces systèmes doivent fonctionner à des températures supérieures à 1100 °C.

Le monoxyde de carbone, sous-produit de nombreuses réactions de combustion partielle, est un exemple de gaz pouvant brûler par combustion directe dans une flamme. L'hydrogène sulfuré en est un autre mais sa combustion produit toutefois des émissions de dioxyde de soufre (SO_2).

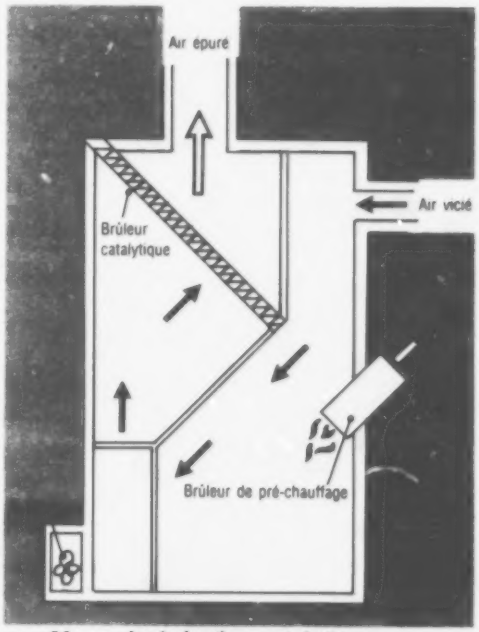
Lorsque la concentration des contaminants est inférieure à la limite d'inflammabilité, on doit recourir aux techniques d'incinération thermique ou d'incinération catalytique. L'incinération thermique est effectuée à des températures qui varient généralement entre 540 °C et 820 °C. L'efficacité de ce procédé de combustion est fonction de trois paramètres étroitement liés: temps, température et turbulence nécessaires à la combustion complète des contaminants (figure 30 b). L'incinération catalytique est effectuée à des températures inférieures à la température d'autocombustion des contaminants, soit de 300 °C à 500 °C (figure 30 c). Dans ce procédé, le catalyseur, composé le plus souvent de platine ou de palladium, favorise l'abaissement de la température de combustion. Le rendement d'épuration de ces procédés d'incinération peut atteindre 98 pour cent.



30 a — **Incinération directe dans une flamme (torche)**



30 b — **Incinération thermique**



30 c — **Incinération catalytique**

FIGURE 30 — **Épuration par combustion**

6.2.3 *Le traitement des émissions provenant des véhicules à moteur*

La part importante de cette source d'émission justifie amplement les efforts entrepris depuis 1975 afin de diminuer les émissions de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures et d'oxydes d'azote. Plusieurs dispositifs visant à contrôler la température de l'air d'admission et l'avance d'allumage contribuent à la réduction des émissions. La soupape de recirculation des gaz d'échappement permet de diminuer la température à l'intérieur de la chambre de combustion et de cette façon, de réduire la formation d'oxydes d'azote. Une première génération de convertisseurs catalytiques (convertisseurs à deux voies), encore très répandue aujourd'hui, transforme par oxydation le monoxyde de carbone et les hydrocarbures en dioxyde de carbone et en eau. Un apport d'oxygène aux gaz d'échappement est souvent indispensable pour que l'oxydation se réalise. Une seconde génération de convertisseurs catalytiques

(convertisseurs à trois voies) permet de plus l'élimination d'une grande partie des émissions d'oxydes d'azote. Une réaction chimique de réduction transforme dans un premier temps les oxydes d'azote en azote et en oxygène. Cette réaction est favorisée dans un milieu pauvre en oxygène. L'oxydation des hydrocarbures et du monoxyde de carbone est réalisée par la suite avec un apport d'air au niveau du convertisseur. Ce type de convertisseur permet de rencontrer des normes d'émissions plus restrictives.

Les convertisseurs catalytiques sont situés habituellement juste en aval du collecteur de gaz d'échappement. Les catalyseurs se présentent souvent sous la forme de billes d'aluminium recouvertes de platine et de palladium pour l'oxydation des hydrocarbures et du monoxyde de carbone, de rhodium pour la réduction des oxydes d'azote (figure 31). Pour que le pourcentage de contaminants éliminés demeure satisfaisant, le rapport air—carburant au niveau de la chambre de combustion doit être maintenu le plus près possible du rapport stœchiométrique (14,6 volumes d'air pour un volume de carburant) afin de maintenir dans les gaz d'échappement une concentration d'oxygène adéquate pour oxyder les hydrocarbures et le monoxyde de carbone sans nuire à la réduction des oxydes d'azote. La figure 32 montre qu'un rapport air—essence élevé, c'est-à-dire pauvre en essence, favorise l'oxydation des hydrocarbures et du monoxyde de carbone par les convertisseurs, mais empêche la réduction des oxydes d'azote. Le contraire se produit lorsque le rapport est beaucoup plus petit que le rapport stœchiométrique, c'est-à-dire avec un mélange riche en essence. La meilleure performance des catalyseurs est obtenue lorsque le rapport air—essence est légèrement plus riche que le rapport stœchiométrique. Les véhicules munis d'un convertisseur catalytique ne fonctionnent qu'avec de l'essence sans plomb, car ce dernier rend inefficaces les matières catalytiques.

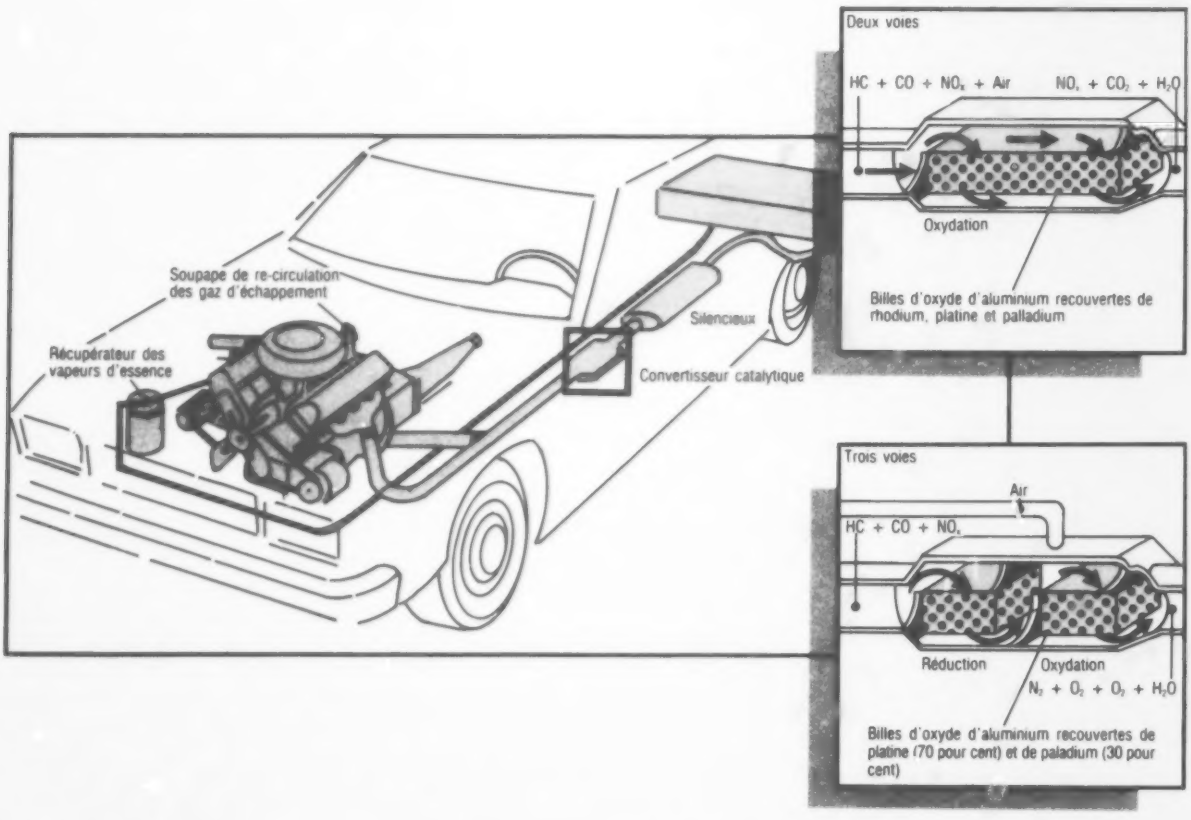
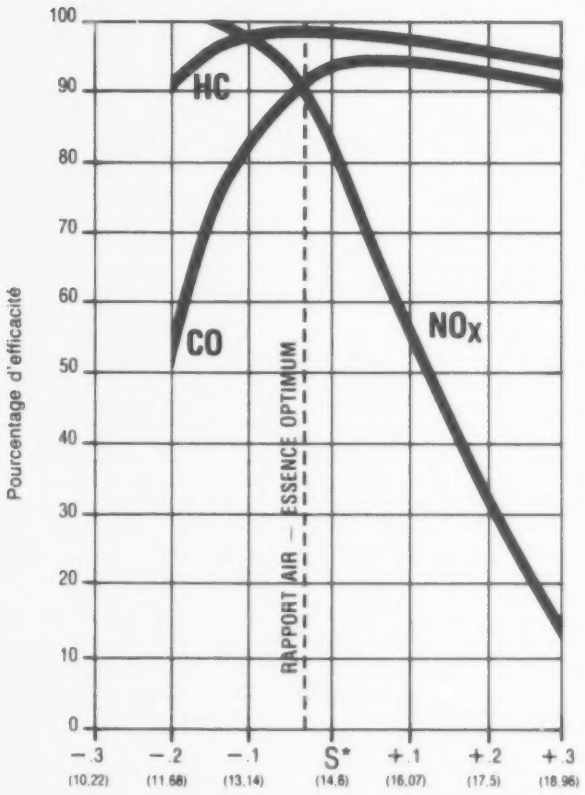


FIGURE 31 — **Convertisseurs catalytiques à deux et à trois voies**



* S = 14.6 volume d'air pour 1 volume d'essence

FIGURE 32 — **Efficacité des convertisseurs catalytiques en fonction du rapport air—essence**

La réduction des émissions produites par l'évaporation des hydrocarbures se fait, au niveau du moteur, par la ventilation positive du carter. Au niveau du carburateur et du réservoir, elle s'accomplit au moyen d'un filtre au charbon qui restitue ensuite les vapeurs au moteur lorsqu'il est mis en marche.

6.3 *L'aménagement du territoire*

Par le passé, l'implantation des industries tenait compte surtout de critères économiques, sans accorder véritablement d'importance aux problèmes de pollution atmosphérique. Les usines étaient souvent construites à proximité des matières premières, des voies de communication ou des sources d'énergie, dans des endroits généralement peu habités où l'impact, tout au moins sur la population, était minimisé. Toutefois, des villes ne tardaient pas à s'agglomérer autour de ces centres de production. Dans d'autres cas, les usines, surtout celles de transformation, étaient plutôt édifiées à proximité de la main-d'œuvre abondante, le plus souvent au sein des villes existantes.

La croissance anarchique des villes est aussi à l'origine d'une bonne part de la problématique de la pollution atmosphérique. Le développement tentaculaire des banlieues et la concentration des activités dans le centre des villes accentuent les problèmes de transport et la surpopulation de petites surfaces pendant de courtes périodes. On observe généralement que, dans les agglomérations urbaines, la pollution atmosphérique est fonction de la densité d'occupation et d'activité.

Aujourd'hui, l'aménagement du territoire permet de mieux orienter la localisation des nouvelles usines et le développement urbain en fonction de l'ensemble des facteurs qui affectent l'environnement, et de minimiser ainsi les impacts négatifs sur les divers récepteurs. Pour prévenir les problèmes de pollution atmosphérique, les plans de zonage réalisés par les urbanistes doivent tenir compte non seulement de l'utilisation et de l'affectation du sol (industries, services, habitations et infrastructures de transport) mais aussi de l'atmosphère qui l'environne.

Pour toute nouvelle installation industrielle ou infrastructure de transport, on devra donc connaître:

- la nature et l'importance des émissions engendrées par de nouvelles sources;
- la qualité de l'atmosphère des sites considérés;
- la dispersion des contaminants émis en fonction des paramètres météorologiques et topographiques;
- l'impact des nouvelles sources d'émissions atmosphériques sur les récepteurs.

La connaissance de ces données permettra de mieux planifier l'implantation des nouveaux équipements de production, de transport ou de services publics relativement à la qualité du milieu atmosphérique.

6.4 *Les systèmes de contrôle intermittent*

Ces systèmes sont mis en place afin de réduire la fréquence et l'intensité des épisodes de pollution atmosphérique pouvant survenir au niveau du sol à certains moments du jour ou de l'année. Ce moyen de prévention consiste essentiellement à diminuer les émissions en réduisant la production ou en changeant de combustible chaque fois que les systèmes de contrôle intermittent en indiquent la nécessité. Certains systèmes sont basés sur des modèles de prévisions météorologiques, d'autres sur les données d'échantillonnage de réseaux d'alerte. Les systèmes les plus efficaces combinent les deux approches.

6.5 *L'information, l'éducation et la formation*

Pour pouvoir mettre en place les moyens de prévention décrits précédemment, les organismes gouvernementaux de même que les associations œuvrant dans le domaine de la pollution atmosphérique ont la responsabilité d'informer les industriels et la population dans son ensemble, en utilisant les médias les plus appropriés.

Cette forme de prévention doit porter son action au-delà de la simple information. Elle doit susciter des changements de nos attitudes et comportements tant individuels que collectifs face à la perception et à l'utilisation de notre milieu atmosphérique. Parallèlement, la formation des personnes dont le travail ou les activités ont une incidence sur la pollution atmosphérique permet d'espérer une amélioration soutenue des divers aspects qui lui sont rattachés, que ce soit la connaissance de ses paramètres, le bon fonctionnement des équipements de production et de combustion ou la gestion de la pollution atmosphérique. Encore une fois, il incombe aux organismes gouvernementaux et aux associations concernés par la pollution atmosphérique d'élaborer, conjointement avec les établissements d'enseignement, des programmes de formation.

CHAPITRE 7

LA GESTION DU MILIEU ATMOSPHÉRIQUE

7. La gestion du milieu atmosphérique

Chacun d'entre nous a déjà rêvé sans doute d'un environnement complètement exempt de contamination atmosphérique, sans qu'il n'en coûte évidemment trop cher à la société. La gestion du milieu atmosphérique se doit malheureusement d'être beaucoup plus réaliste. Elle tente plutôt d'établir des niveaux acceptables de pollution atmosphérique en rapport avec des coûts de prévention raisonnables pour la communauté. Pour réaliser cet objectif, plusieurs stratégies visant à limiter la pollution peuvent être envisagées. Leur élaboration nécessite cependant l'acquisition et la maîtrise d'une multitude de connaissances. Ces préalables sont:

- la connaissance du milieu atmosphérique (données de qualité de l'atmosphère, données relatives aux sources d'émissions atmosphériques, données météorologiques);
- la connaissance des méthodes de prévisions (modèles de dispersion des contaminants atmosphériques);
- la connaissance des méthodes de prévention de la pollution atmosphérique (action à la source, traitement des effluents, planification des nouvelles sources d'émission, éducation);
- la connaissance des effets des contaminants atmosphériques sur les récepteurs (milieu atmosphérique, biens matériels, végétation, animaux et êtres humains).

La première stratégie est basée sur la surveillance de la qualité de l'atmosphère. Il s'agit dans ce cas de fixer des objectifs ou des normes de qualité de l'atmosphère pour certains contaminants afin d'assurer le confort et le bien-être de la population, d'éviter tout dommage aux espèces animales et végétales, au sol, à l'eau, à la visibilité et aux matériaux. Les normes ou objectifs de la qualité de l'atmosphère permettent d'obtenir une marge de sécurité pour protéger la santé de toute la population, y compris les groupes d'individus les plus susceptibles d'être affectés (personnes âgées, enfants en bas âge, malades). Les objectifs et les normes de la qualité de l'atmosphère sont basés sur des études effectuées sur la réponse des différents récepteurs à diverses doses de contaminants. Les recherches épidémiologiques, cliniques et toxicologiques sont spécifiquement utilisées pour déterminer les normes relatives à la santé.

La seconde approche s'appuie sur des normes d'émission applicables à des sources spécifiques. Des limites d'émission pour les divers points de rejets (tels les cheminées, les lanterneaux et les évents) et les émissions diffuses, ainsi que des limites relatives à la qualité des combustibles et des matières premières employés sont déterminées. Les normes d'émission visent généralement l'apparence visuelle des émissions, l'intensité des odeurs, les quantités de contaminants pouvant être émises sans égard ou en fonction des procédés et des types d'équipements. Ces quantités peuvent être établies en termes absolus (c'est-à-dire la masse permise par rapport à une unité de temps) et en termes relatifs (c'est-à-dire la masse permise par rapport à la quantité de combustible utilisé, à la quantité de matières premières employées ou à la quantité de matériel produit). Les normes d'émission s'appuient sur l'application de la meilleure technologie d'épuration disponible, en tenant compte toutefois des contraintes économiques. Elles peuvent également être élaborées en fonction d'objectifs de la qualité de l'atmosphère. En ce sens, elles constituent souvent un moyen de réalisation de la stratégie de surveillance de la qualité de l'atmosphère.

Un troisième type de stratégies, beaucoup moins répandu que les deux premiers, regroupe ce que l'on appelle couramment les incitatifs économiques. Dans quelques pays, des taxes sur les émissions atmosphériques ou des taxes de vente sur les équipements ou les combustibles sont imposées aux pollueurs afin de les inciter

à réduire leurs émissions. Une approche incitative tout à fait différente consiste à accorder des réductions de taxes, des prêts à taux préférentiel ou des subventions directes aux industries pour qu'elles installent des équipements d'épuration ou qu'elles améliorent leurs installations. Les mesures incitatives sont surtout utilisées comme moyens afin de rencontrer les objectifs de la qualité de l'atmosphère et les normes d'émission à l'atmosphère.

La dernière approche tente d'établir un équilibre entre les coûts associés aux dommages causés sur les divers récepteurs et les coûts associés à la prévention des émissions. L'équilibre se situe au point où la somme des coûts de la prévention et les bénéfices évalués en termes de réduction des dommages est minimale. Cette stratégie implique des contraintes plus grandes sur les sources de pollution en milieu urbain qu'en milieu rural à cause du plus grand potentiel de dommages que l'on y retrouve.

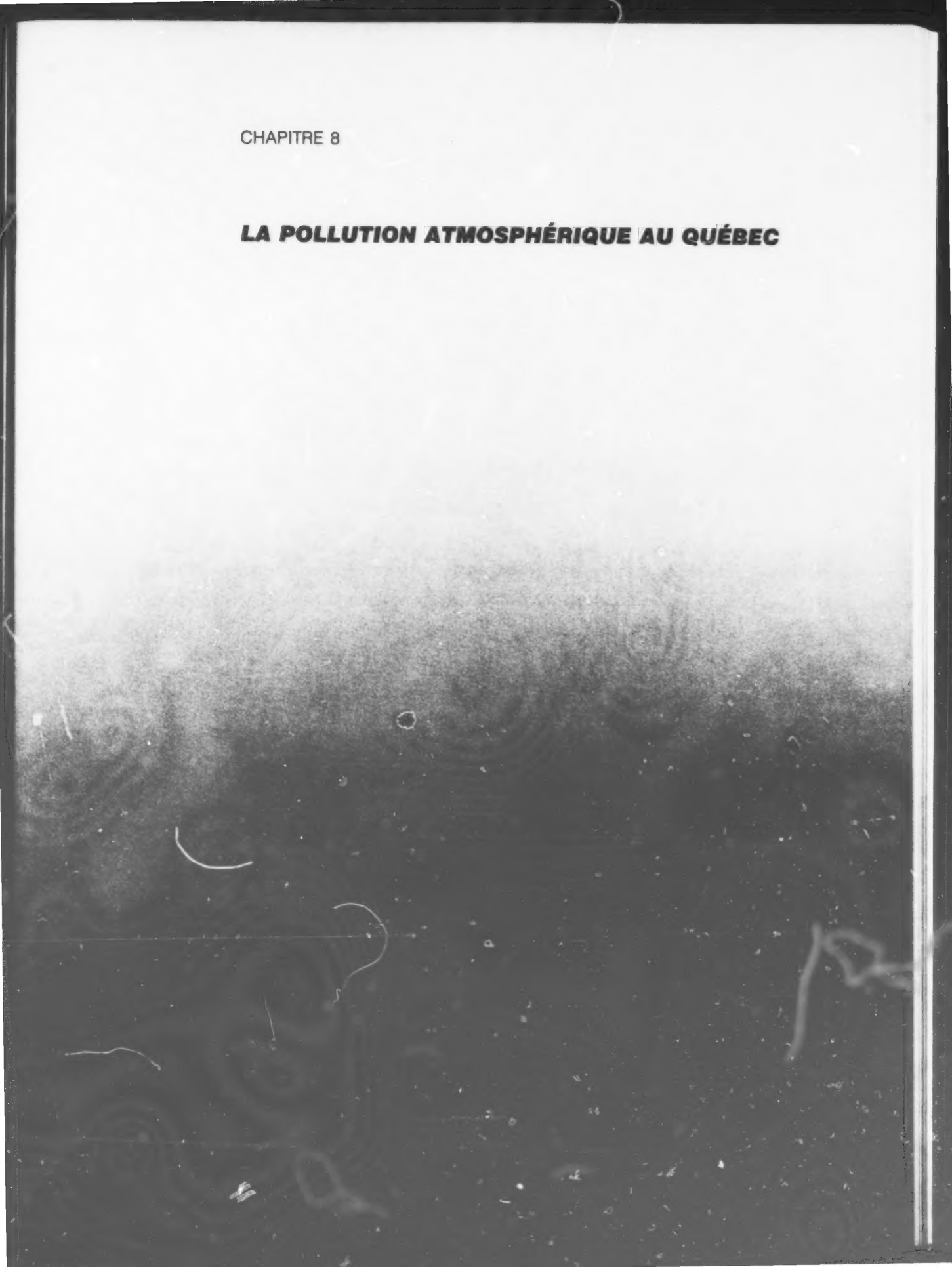
Les grandes cités ont été les premières à réglementer la pollution de l'air. Ces premières réglementations visaient la plupart du temps à limiter les nuisances causées par les émissions atmosphériques. Par la suite, les gouvernements nationaux de plusieurs pays, états et provinces ont énoncé des normes minimales devant être appliquées à l'ensemble de leur territoire. Au-delà du simple contrôle des nuisances, les actions nationales visent à minimiser non seulement les effets à court et à moyen termes de la pollution atmosphérique sur les divers récepteurs, mais aussi et de plus en plus les effets subtils.

La pollution atmosphérique ne connaissant pas de frontières politiques, la problématique des précipitations acides en fait foi, il est indispensable que les réglementations débordent de leur cadre national et que des stratégies internationales soient adoptées par les gouvernements. Des normes minimales à l'échelle internationale favoriseraient aussi une uniformisation des disparités relatives aux exigences environnementales. Il n'est pas rare en effet de voir des gouvernements relâcher leurs exigences afin d'attirer ou de maintenir des industries, ce qui a souvent pour effet de rendre non compétitifs les pays ayant des exigences environnementales sévères pour leurs industries.

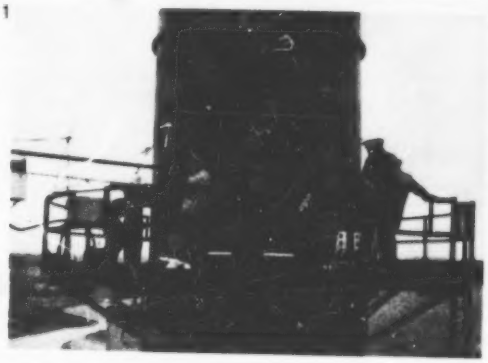
Lorsque les réglementations sont adoptées, le rôle des organismes gouvernementaux concernés consiste par la suite à s'assurer de la mise en place des moyens de prévention de la pollution atmosphérique propres à mener à bien les stratégies déployées afin de maintenir un niveau de qualité de l'atmosphère acceptable pour toute la collectivité.

CHAPITRE 8

LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE AU QUÉBEC



8. La pollution atmosphérique au Québec



1-Échantillonnage à la source.
2-Échantillonnage du milieu atmosphérique.

8.1 Les émissions de contaminants atmosphériques

Selon un inventaire des émissions atmosphériques établi en 1978 par Environnement Canada, les sources majeures de pollution ont émis au Québec 2 026 000 tonnes de monoxyde de carbone, 1 104 000 tonnes d'oxydes de soufre[1], 602 000 tonnes de matières particulaires, 433 000 tonnes d'hydrocarbures volatils et 332 000 tonnes d'oxydes d'azote[2]. Le total de ces émissions se chiffrait à près de 4 500 000 tonnes. La figure 33 indique la part relative des émissions atmosphériques en fonction des contaminants, tandis que la répartition des émissions atmosphériques en fonction des secteurs d'activité telle qu'illustrée à la figure 34 montre la prépondérance des émissions dues aux secteurs du transport et des activités industrielles. Les émissions atmosphériques de ces secteurs s'accaparent respectivement 39,8 et 38,6 pour cent des émissions totales au Québec.

Les émissions atmosphériques des principaux contaminants se répartissent de façon très différente selon le secteur d'activité (tableau 10). Les activités industrielles constituent la principale source d'émission de matières particulaires et d'oxydes de soufre tandis que les émissions de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote sont surtout dues au secteur du transport (figure 35). Au Québec, les sources industrielles majeures de matières particulaires sont l'extraction des minerais et de la pierre, la production de minéraux (amiante, ciment) et de métaux (aluminium, cuivre, fer). Pour leur part, les émissions de dioxyde de soufre proviennent surtout des usines d'extraction du cuivre, des usines de pâtes et papiers et des raffineries de pétrole. Les automobiles mues à l'essence sont les principales responsables des émissions de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures et d'oxydes d'azote. Les véhicules mus au carburant diesel constituent aussi une source importante d'oxydes d'azote.

Selon le ministère de l'Environnement du Québec, les émissions de dioxyde de soufre s'établissaient à 1 085 000 tonnes pour l'année 1980 (tableau 11). À elle seule, l'usine d'extraction du cuivre de Noranda représentait plus de la moitié des émissions québécoises de SO_2. Depuis, la conversion au gaz naturel et à l'hydro-électricité des systèmes conventionnels de combustion, la modernisation des usines de pâtes et

1. Sous forme de SO_2.
2. Sous forme de NO_2.

papiers, la diminution de la teneur en soufre du coke utilisé dans les alumineries et la diminution de la production du cuivre ont permis, selon des estimations valables pour le début de 1985, de réduire d'environ 25 pour cent ces émissions. Le Québec prévoit pouvoir réduire à environ 600 000 tonnes les émissions annuelles de SO_2 d'ici la fin de la présente décennie. Quant aux émissions d'oxydes d'azote, on croît qu'elles se chiffreront entre 380 000 et 420 000 tonnes vers l'an 2000, selon que des normes d'émission plus sévères s'appliquant aux véhicules automobiles entreront ou non en vigueur en 1987.

TABLEAU 10 — **Émissions atmosphériques des principaux contaminants en fonction des secteurs d'activité au Québec en 1978 (en tonnes)**

	INDUSTRIE		TRANSPORT		DIVERS	
		COMBUSTION		INCINÉRATION		TOTAL
Particules	438 929	48 328	19 903	7 820	28 731	543 711
SO_2	712 965	359 445	46 048	953	—	1 119 411
CO	461 139	118 020	1 313 934	70 372	64 140	2 027 605
NO_2	10 283	96 360	221 275	1 484	2 311	331 713
HC_x	96 705	30 422	169 279	5 568	125 902	427 876
Total	1 720 021	652 575	1 770 439	86 197	221 084	4 450 316

Service de la protection de l'environnement, 1982, INVENTAIRE NATIONAL DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES (1978), Environnement Canada.

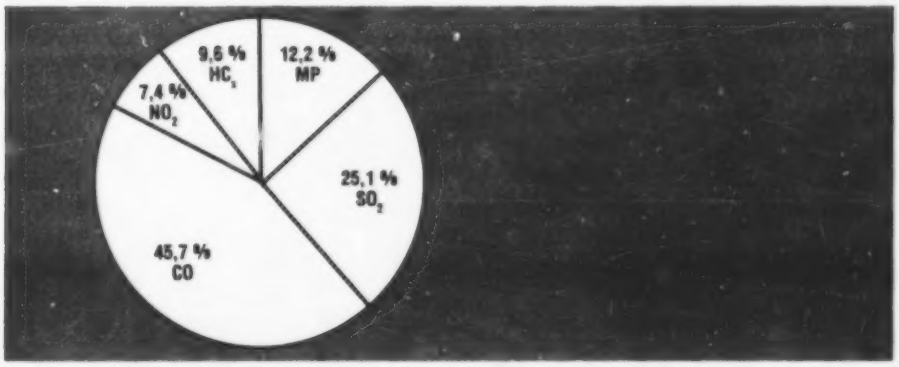


FIGURE 33 — **Répartition des émissions atmosphériques en fonction des principaux contaminants, Québec (1978)**

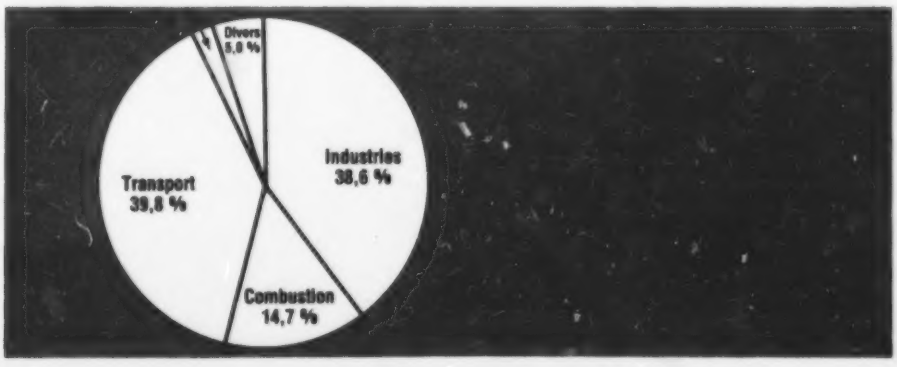


FIGURE 34 — **Répartition des émissions atmosphériques en fonction des principaux secteurs d'activité, Québec (1978)**

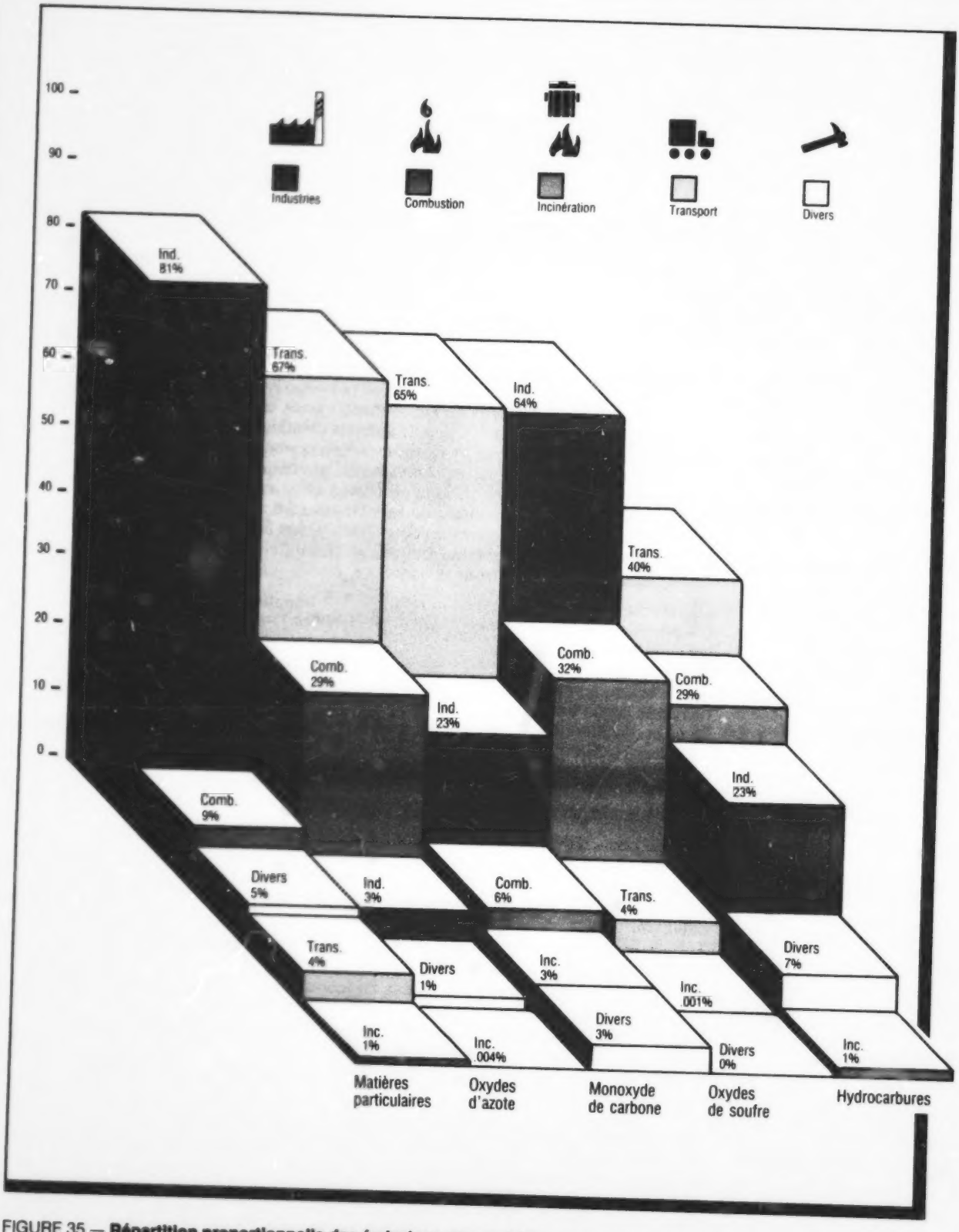


FIGURE 35 — **Répartition proportionnelle des émissions atmosphériques provenant des principaux secteurs d'activité en fonction des principaux contaminants, Québec (1978)**

TABLEAU 11 — **Émissions de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote au Québec en 1980 (en tonnes)**

ACTIVITÉ	SO_2	*(pourcentage)*	NO_x	*(pourcentage)*
Industrie	778 500	(72)	12 350	(4)
Combustion à des fins industrielles, commerciales et résidentielles	258 000	(24)	94 000	(29)
Transport	48 500	(4)	221 000	(67)
Total	1 085 000	(100)	331 350	(100)

Direction de l'assainissement de l'air, ministère de l'Environnement du Québec.

8.2 *Le réseau de surveillance de la qualité de l'atmosphère*

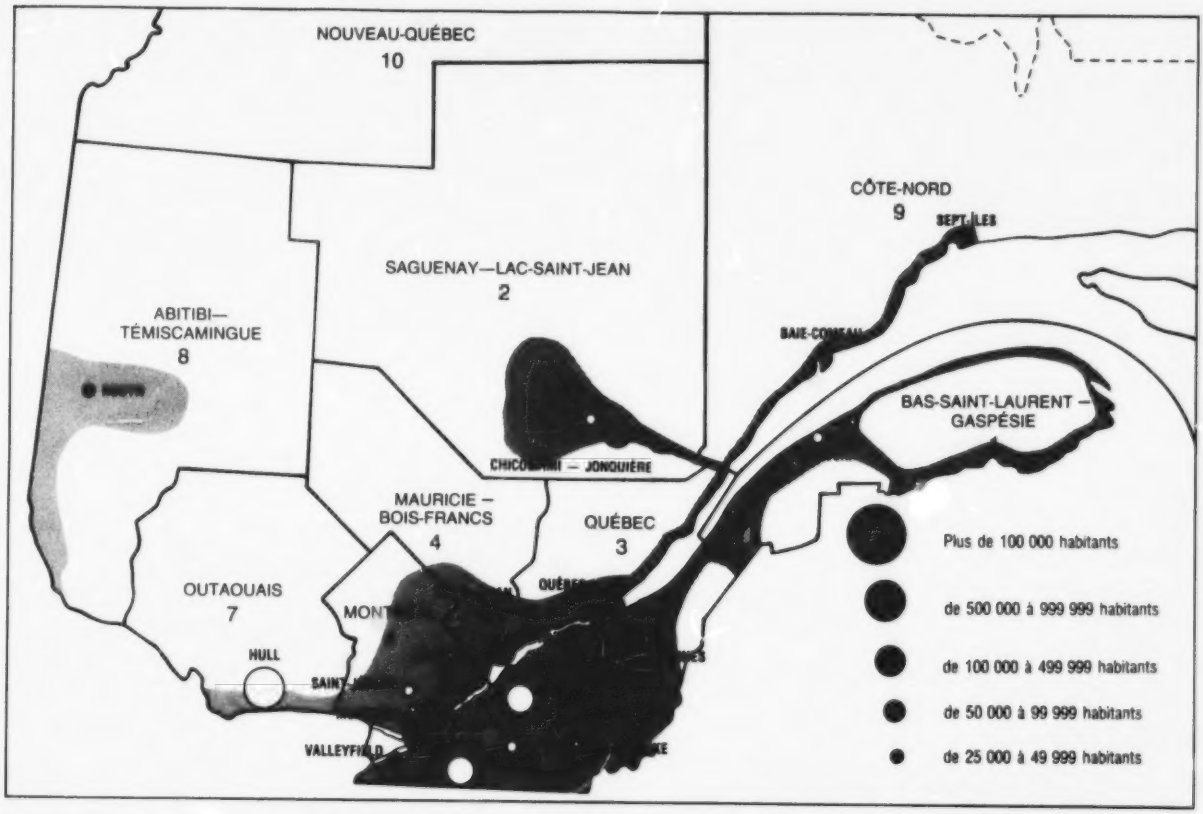
En 1985, le réseau québécois de surveillance de la qualité de l'atmosphère compte 95 postes d'échantillonnage répartis dans 50 municipalités regroupées dans 19 agglomérations urbaines. Les contaminants échantillonnés sont les particules en suspension (celles plus petites que 100 μm), le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone, le dioxyde d'azote et l'ozone. D'autres mesures comme l'indice de sulfatage (indicateur des composés soufrés présents dans l'atmosphère) et l'indice de souillure (indicateur du pouvoir salissant des particules en suspension dans l'atmosphère) sont également prises. Des analyses spécifiques sont réalisées à partir des échantillons de particules en suspension pour mesurer les concentrations de sulfates et de nitrates ainsi que des métaux comme le plomb, le fer, le zinc, le manganèse, le magnésium, le vanadium et le cadmium.

L'ensemble de ces paramètres n'est toutefois pas mesuré à chacun des postes d'échantillonnage. Ils sont plutôt répartis en fonction des problèmes rencontrés dans les différentes agglomérations ou dans leurs quartiers. Le lecteur trouvera au tableau 12 la liste des agglomérations où le ministère de l'Environnement du Québec exploite actuellement au moins un poste, ainsi que les contaminants qui y sont échantillonnés. Une étude est présentement en cours afin d'optimaliser le réseau de surveillance et de l'étendre à l'ensemble des agglomérations urbaines où la population est supérieure à 25 000 habitants, tel qu'illustré à la figure 36. À cause des sources industrielles importantes, des agglomérations comme celles de La Baie, Asbestos, Bécancour, Beauharnois, Murdochville font aussi partie du réseau de surveillance même si leur population est inférieure au seuil précité.

Chaque poste d'échantillonnage répond à au moins un des objectifs définis à la section 5.3. Les objectifs les plus souvent visés par le réseau de surveillance sont la surveillance et la connaissance de la qualité de l'atmosphère. Chacun des postes d'échantillonnage du réseau de surveillance s'oriente vers au moins un des aspects suivants:

- la détermination des concentrations représentatives de secteurs densément peuplés;
- la détermination des plus hautes concentrations que l'on puisse rencontrer sur un territoire couvert par le réseau de surveillance;
- la détermination de l'impact de sources d'émission spécifiques sur le niveau de la qualité de l'atmosphère;
- la détermination du niveau de fond des concentrations pour un territoire donné.

Chaque poste d'échantillonnage doit respecter dans la mesure du possible les critères de localisation retenus pour chaque contaminant. Les postes d'échantillonnage se présentent surtout de deux façons. La première regroupe les équipements de mesure de plusieurs contaminants à l'intérieur d'une maisonnette conçue spécialement pour l'échantillonnage de la qualité de l'atmosphère (figure 37). Dans le second cas, les appareils sont simplement installés sur le toit d'édifices publics tels les écoles et les bâtiments municipaux (figure 38).



● Agglomération faisant partie du réseau de surveillance en 1985.

○ Agglomération visée par l'élargissement projeté au réseau de surveillance pour 1986 et 1987.

FIGURE 36 — **Répartition dans les régions administratives des agglomérations urbaines québécoises de plus de 25 000 habitants en fonction de la taille en 1981**

FIGURE 37 — **Poste d'échantillonnage: maisonnette**

FIGURE 38 — **Poste d'échantillonnage: toiture**

TABLEAU 12 — **Répartition des mesures d'échantillonnage dans les agglomérations québécoises par région administrative, avril 1985**

RÉGION	SOUS-RÉSEAU	P.S.[1]	R.P.[2]	I.S.[3]	I.SUL.[4]	SO_2	H_2S	CO	O_3	NO_x	HF
01	Murdochville	2	—	—	—	1	—	—	—	—	—
02	Chicoutimi — Jonquière	5	5	1	—	1	—	—	—	—	1
	La Baie	4	4	—	—	—	—	—	—	—	—
03	Québec	13	13	—	3	4	—	1	2	1	—
	Thetford-Mines — Black-Lake	3	3	—	—	—	—	—	—	—	—
04	Trois-Rivières — Cap-de-la-Madeleine	6	6	1	2	2	1	—	—	—	—
	Shawinigan	6	6	1	—	1	—	—	—	—	1
	Bécancour	2	2	—	—	—	—	—	—	—	—
	La Tuque	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—
	Asbestos	2	2	—	—	—	—	—	—	—	—
06	Montréal (région métropolitaine)*	27	17	7	9	18	1	11	12	11	—
	Sorel — Tracy	3	3	—	—	—	—	—	—	—	—
	Joliette	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—
	Valleyfield	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—
	Beauharnois	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—
08	Rouyn	2	2	—	—	2	—	—	—	—	—
09	Sept-Îles	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Baie-Comeau	1	—	—	—	1	—	—	—	—	—
	Total	79	68	10	14	31	2	12	14	12	2

Direction de l'assainissement de l'air, ministère de l'Environnement du Québec.

1. Particules en suspension
2. Retombées de poussières
3. Indice de souillure
4. Indice de sulfatage

* Les postes de la région métropolitaine de Montréal localisés sur l'Île-de-Montréal sont exploités par la Communauté urbaine de Montréal (protocole d'entente avec le ministère de l'Environnement du Québec).

8.3 *Aperçu de la qualité de l'atmosphère au Québec*

Au cours des dix dernières années, la qualité de l'atmosphère de la plupart des agglomérations québécoises s'est maintenue ou sensiblement améliorée. Dans l'ensemble, cette évolution résulte de la mise en application de diverses réglementations touchant la qualité du milieu atmosphérique. Examinons brièvement la situation pour chacun des principaux contaminants atmosphériques.

- **Matières particulaires**

  L'amélioration de la qualité de l'atmosphère, en ce qui a trait aux matières particulaires, se traduit par un abaissement des concentrations moyennes annuelles des particules en suspension totales (figure 39, page suivante). La norme annuelle qui est de 70 $\mu g/m^3$ est maintenant rencontrée pour la majorité des postes d'échantillonnage. Le cas de l'agglomération montréalaise illustre bien cette tendance puisque plus de 60 pour cent des postes d'échantillonnage excédaient la norme annuelle en 1975, alors que ce pourcentage ne représentait plus que 8 pour cent en 1984. On peut aussi observer une réduction du pourcentage de dépassement de la norme sur 24 heures fixée à 150 $\mu g/m^3$. À Montréal, ce pourcentage est passé de 18 pour cent en 1975 à 4 pour cent en 1984. La diminution de l'empoussiérage découle en grande partie de la réduction des émissions dues à des activités industrielles à la suite de travaux de modernisation et d'assainissement effectués dans plusieurs usines. La tendance est d'autant plus nette que la structure industrielle de l'agglomération est importante, comme c'est le cas notamment pour Shawinigan, Sorel — Tracy et Thetford-Mines — Black-Lake.

- **Plomb**

  La concentration de plomb dans l'atmosphère a diminué de près de 60 pour cent en moyenne au cours de la période 1975-1984. Cette réduction est étroitement associée à la diminution de la consommation d'essence avec plomb. La figure 40 illustre bien cette réduction pour quelques postes de la région de Montréal. En 1984, les concentrations moyennes annuelles se situent pour la plupart des postes à des niveaux au moins cinq fois inférieurs à la norme annuelle de 2 $\mu g/m^3$.

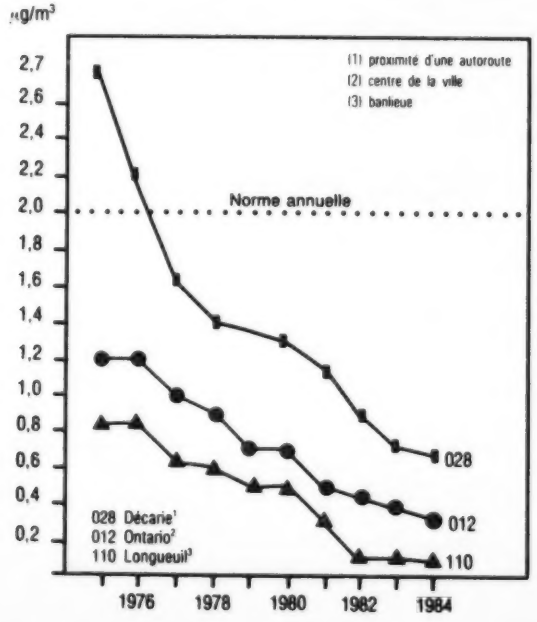
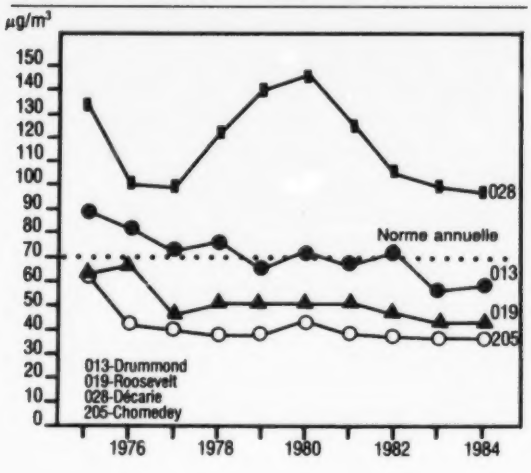
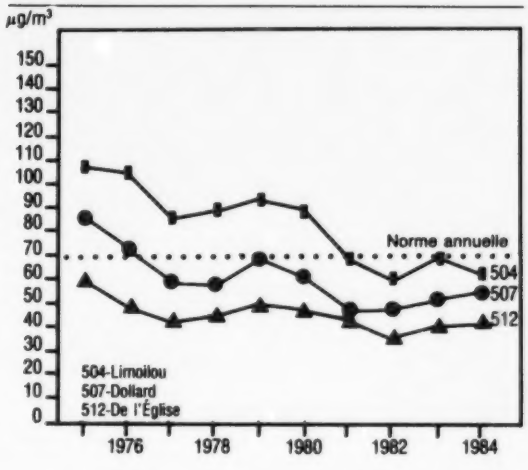


FIGURE 40 — **Plomb: évolution des concentrations moyennes annuelles entre 1975 et 1984 pour quelques postes d'échantillonnage de la région de Montréal**

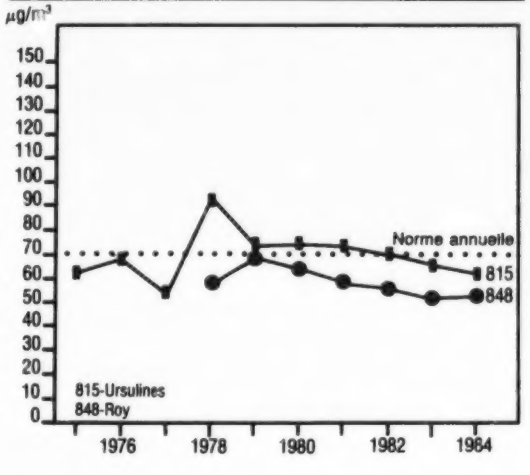
a) MONTRÉAL (région métropolitaine)



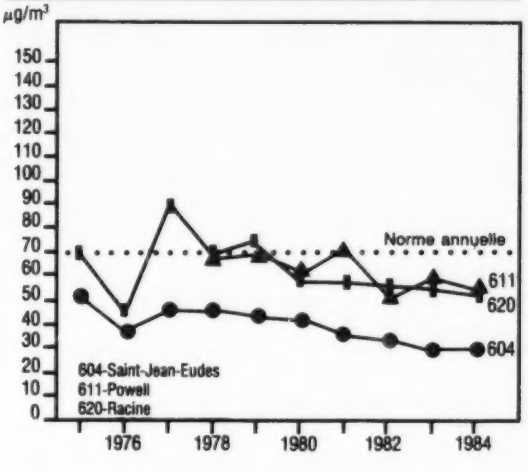
b) QUÉBEC



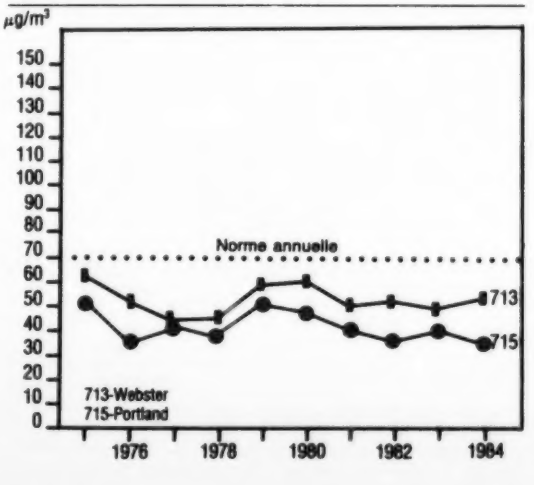
c) TROIS-RIVIÈRES — CAP-DE-LA-MADELEINE



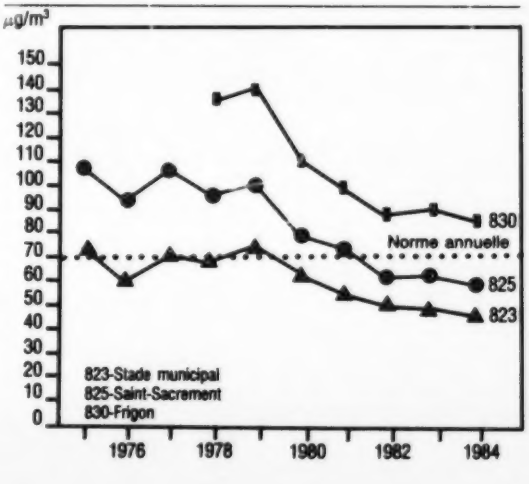
d) CHICOUTIMI — JONQUIÈRE



e) SHERBROOKE



f) SHAWINIGAN



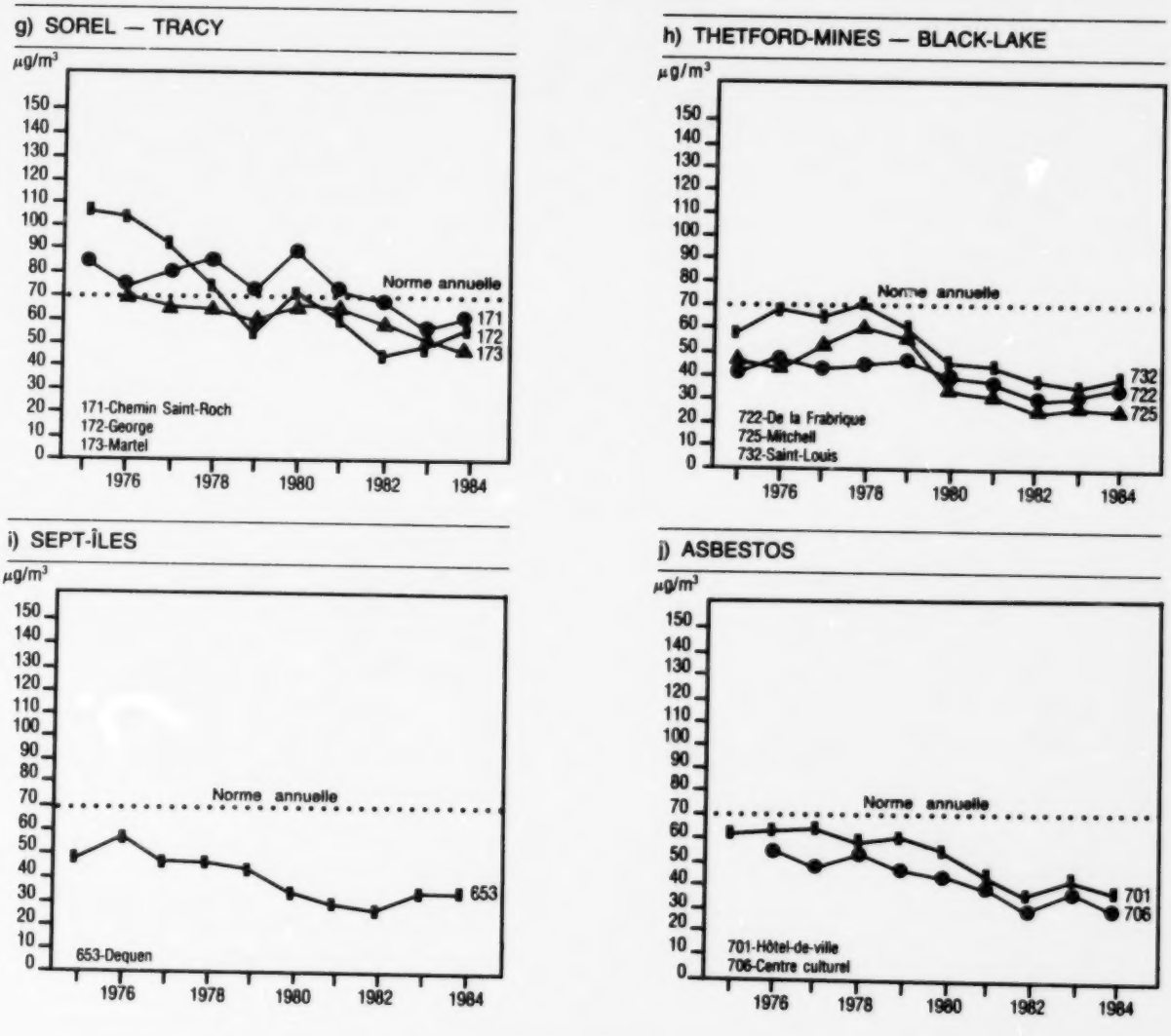


FIGURE 39 — **Particules en suspension: évolution des moyennes géométriques annuelles entre 1975 et 1984 pour quelques postes d'échantillonnage au Québec**

- **Monoxyde de carbone**

  Une diminution des concentrations de monoxyde de carbone a aussi été observée au cours des dix dernières années. Cette amélioration s'explique par l'augmentation du nombre de véhicules automobiles munis de dispositifs antipollution afin de rencontrer les normes fédérales d'émission établies depuis 1975 pour les véhicules neufs. L'évolution des concentrations moyennes annuelles de ce contaminant pour deux postes d'échantillonnage de Montréal, fortement influencés par la circulation, démontre nettement cette tendance (figure 41). Ainsi, les concentrations moyennes annuelles mesurées en 1984 au poste Drummond ont diminué de moitié par rapport aux concentrations mesurées en 1975. On a estimé dans ce cas que l'intensité de la circulation automobile est demeurée à peu près stable tout au long de la période.

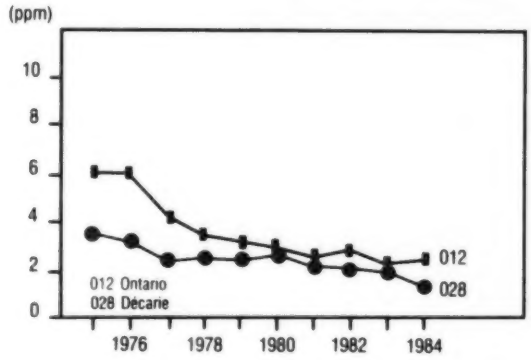


FIGURE 41 — **Monoxyde de carbone: évolution des concentrations moyennes annuelles entre 1975 et 1984 pour quelques postes de la région de Montréal**

- **Dioxyde de soufre**

  La situation du dioxyde de soufre s'est améliorée pour certaines agglomérations (Montréal, Trois-Rivières — Cap-de-la-Madeleine, Shawinigan) tandis qu'elle n'a pas changé de façon significative pour d'autres (Rouyn, Jonquière). La figure 42 illustre ces diverses tendances. La diminution de la teneur en soufre dans les huiles lourdes destinées à la combustion, le succès des programmes de conversion énergétique tant au niveau domestique qu'industriel, les modifications de procédés industriels et la fermeture de quelques industries sont autant de facteurs qui peuvent expliquer la réduction des concentrations annuelles de dioxyde de soufre.

  Les concentrations annuelles mesurées dans certaines agglomérations industrielles comme Rouyn et Jonquière ne montrent pas de variations significatives au cours de la dernière décade, les industries n'ayant pas diminué leurs émissions de façon notable. Les normes horaires et sur 24 heures ont été plus souvent excédées que dans le premier groupe d'agglomérations. À Rouyn, les postes d'échantillonnage sont maintenant intégrés à un système de contrôle intermittent qui permet à l'industrie d'ajuster sa production de manière à limiter les épisodes de pollution à l'intérieur de l'agglomération urbaine.

- **L'ozone et les oxydes d'azote**

  Les mesures d'ozone et de dioxyde d'azote prélevées au cours des dernières années ne permettent pas d'identifier des changements significatifs. En milieu urbain, contrairement au dioxyde d'azote et aux autres contaminants, les concentrations d'ozone tendent à diminuer à mesure que l'on se rapproche du centre de la ville et des hautes concentrations de véhicules, les niveaux les plus élevés étant mesurés en banlieue (Dorval, Laval, Dollard-des-Ormeaux, Pointe-aux-Trembles). Cette situation pourrait s'expliquer, comme nous l'avons vu précédemment au point 2.2.5, par la réaction survenant entre l'ozone et le

monoxyde d'azote qui a comme conséquence une diminution des concentrations d'ozone, notamment à proximité des grandes concentrations de véhicules automobiles.

Les niveaux moyens d'ozone les plus élevés se rencontrent habituellement en mai, juin et juillet, surtout entre 13 heures et 16 heures, mais aussi entre 21 heures et 24 heures. On croit que les épisodes d'après-midi proviennent en grande partie du transport à grande distance de l'ozone et des contaminants précurseurs, puisqu'ils sont le plus souvent associés à des vents du sud et du sud-ouest. Il est évident que les contaminants précurseurs locaux participent aussi à l'apparition de ces épisodes, notamment lorsque les conditions synoptiques sont stagnantes. La part relative du transport à grande distance et des précurseurs locaux est cependant difficile à déterminer. Les épisodes nocturnes pourraient s'expliquer, selon certains chercheurs, par un apport d'air riche en ozone stratosphérique.

Au cours des prochaines années, une attention particulière sera apportée à la mesure de l'ozone en milieu rural afin de déterminer les niveaux d'exposition des milieux agricoles et forestiers.

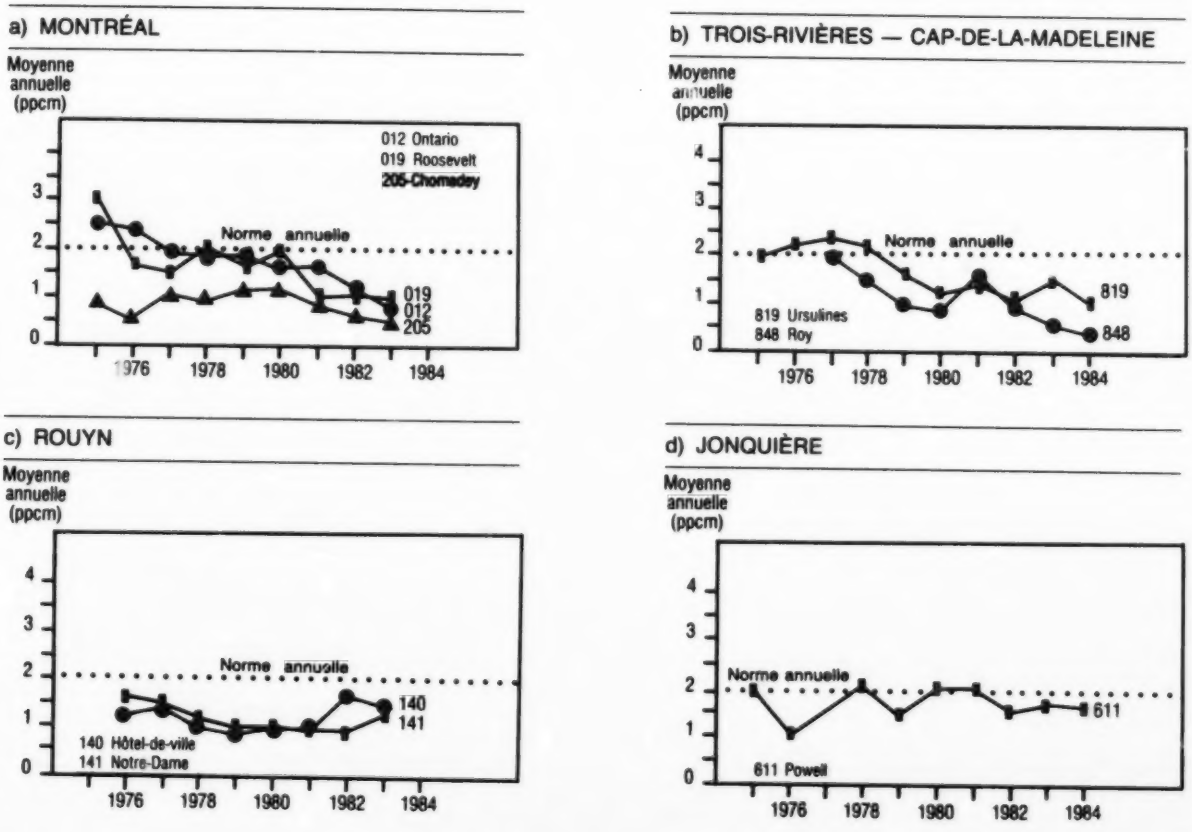


FIGURE 42 — **Dioxyde de soufre: évolution des concentrations moyennes annuelles entre 1975 et 1984 pour quelques postes d'échantillonnage au Québec**

8.4 *Les effets sur les récepteurs*

Les effets de la pollution atmosphérique se manifestent de deux façons sur le territoire québécois. Ils résultent soit de la pollution atmosphérique locale ou régionale, soit du transport des contaminants à l'échelle continentale.

8.4.1 *Effets de la pollution atmosphérique à l'échelle locale*

Dans l'ensemble, l'amélioration de la qualité de l'atmosphère à cette échelle a permis sans nul doute d'atténuer l'impact de la pollution atmosphérique sur les divers récepteurs, tel que décrit au chapitre 5. Nous ne disposons pas, fort malheureusement, de chiffres pour appuyer cette affirmation. Il semble toutefois que certains types de dommages surviennent beaucoup moins fréquemment qu'il y a quelques années. Ainsi, les dommages apparents causés à la végétation surtout par les fluorures auraient régressé considérablement si l'on se fie aux observations qualitatives faites sur le terrain. Les mêmes remarques s'appliquent en ce qui a trait à la fluorose des bovins. D'autre part, il paraît raisonnable de croire que les coûts de nettoyage des édifices publics et des propriétés privées se sont réduits, compte tenu de la diminution sensible des matières particulaires en suspension dans l'air. La réduction des oxydes de soufre a certainement diminué la corrosion des peintures et des métaux de même que la détérioration de certaines pierres. La diminution simultanée des particules et des oxydes de soufre ne peut qu'avoir réduit la part des coûts associés aux problèmes de santé.

Bien que la qualité de l'atmosphère se soit améliorée considérablement, il existe encore certains foyers de pollution atmosphérique, notamment dans des villes industrielles comme Rouyn, Jonquière, Shawinigan et Beauharnois, susceptibles de porter atteinte aux biens matériels, à la végétation, aux animaux, voire même au bien-être de la population. Par ailleurs, d'autres interrogations font surface. Ainsi, par exemple, la popularité croissante du chauffage résidentiel au bois peut-elle affecter le bien-être et la santé des communautés sachant que la combustion du bois émet des composés réputés cancérigènes comme les hydrocarbures polynucléaires aromatiques? Quels sont les risques associés à l'incinération des déchets domestiques et industriels pour la population lorsque l'on sait que ce mode d'élimination des déchets produit des dioxines et des furannes, des contaminants dont certains congénères auraient un potentiel cancérigène? Ces interrogations, comme bien d'autres, font aujourd'hui partie des préoccupations des différents organismes responsables de la gestion de la qualité de l'atmosphère, au Québec comme ailleurs dans le monde.

8.4.2 *Effets de la pollution atmosphérique à l'échelle synoptique*

Les effets de cet ordre touchent en particulier la problématique des précipitations acides. Depuis quelques années, beaucoup d'efforts ont été fournis afin d'évaluer tant le niveau d'acidité des précipitations que leurs effets sur le milieu aquatique, le milieu terrestre, les biens matériels et la santé.

La figure 43 présente la distribution des moyennes pondérées de pH dans les précipitations pour les années 1982-1983. Une précipitation est dite «acide» lorsque son pH est inférieur à 5,6. On note que les pH les plus acides se retrouvent dans les régions de Jonquière, Québec, Montréal et Rouyn-Noranda. La figure 44 montre la distribution spatiale des dépôts humides annuels de sulfates pour les années 1982-1983. On constate que le sud du Québec reçoit des dépôts supérieurs à 20 kg/ha/an, seuil retenu actuellement pour protéger principalement les écosystèmes aquatiques les plus sensibles. Pour sa part, la figure 45 montre la distribution spatiale des dépôts humides annuels de nitrates. Les valeurs les plus élevées se retrouvent aussi dans le Québec méridional. La répartition des dépôts de sulfates et de nitrates suggère l'influence importante des régions sources de SO_2 et NO_x situées au sud-ouest du Québec ainsi que l'influence superposée des sources régionales.

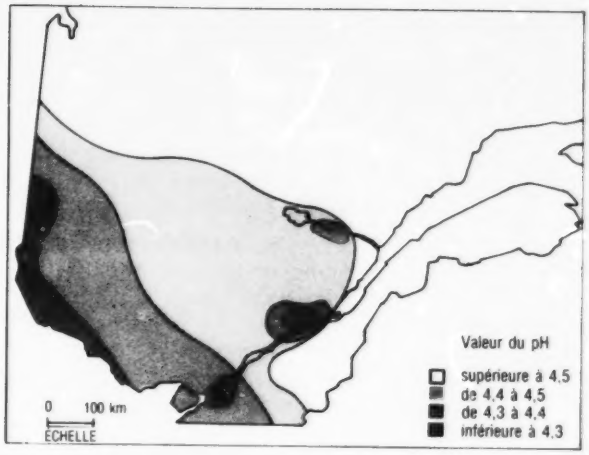


FIGURE 43 — **Moyenne pondérée du pH des précipitations (1982-1983)**

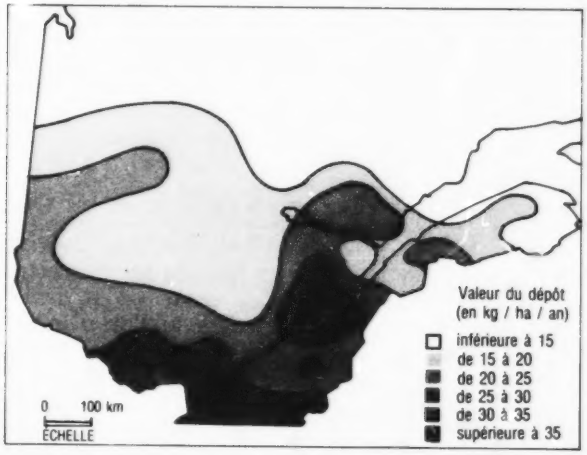


FIGURE 44 — **Dépôts annuels humides de sulfates (1982-1983)**

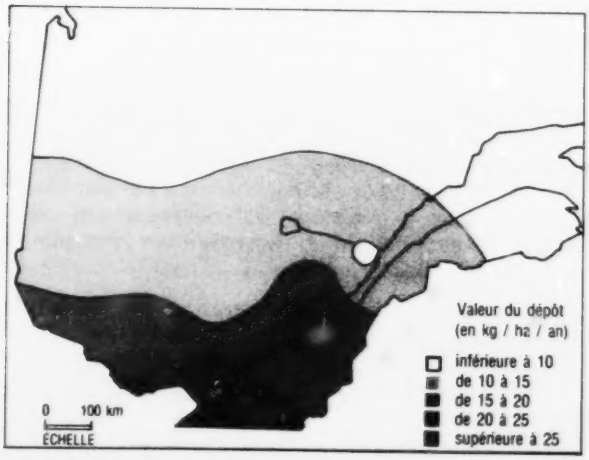


FIGURE 45 — **Dépôts annuels humides de nitrates (1982-1983)**

Les effets des précipitations acides sur le milieu aquatique ont été les plus étudiés à ce jour. Il semble bien que l'on puisse attribuer la diminution de la variété et de la densité des poissons à l'acidification des eaux, dans certains lacs du Témiscamingue. On a aussi constaté que la densité de population d'omble de fontaine est plus faible dans les lacs acides (pH = 5,5) des réserves des Laurentides et de Portneuf. L'analyse physico-chimique de l'eau de trois lacs de la Zec des Martres, dans Charlevoix, indique que la cause la plus probable de la disparition de l'omble de fontaine serait le haut niveau d'acidité de ces lacs (pH inférieur à 5).

L'impact de ces précipitations sur le milieu terrestre québécois est beaucoup moins connu. Même si les effets potentiels sont identifiés au niveau des expériences en laboratoire, il n'est pas possible de conclure actuellement que les mêmes effets se produisent sur le terrain. On soupçonne néanmoins que les précipitations acides pourraient expliquer en partie, le dépérissement de la forêt québécoise observé au cours des dernières années, notamment dans les érablières. Les chercheurs croient maintenant que des contaminants atmosphériques comme l'ozone, participent aussi à ce phénomène.

Au Québec, les précipitations acides contribuent également, avec la pollution locale, à la dégradation des biens matériels. Très peu de recherches sont effectuées cependant sur ce sujet.

Il est peu probable que les précipitations acides aient un effet direct sur la santé humaine. Elles pourraient toutefois avoir un impact indirect à la suite de l'absorption par les poissons destinés à la consommation de certains métaux lourds plus facilement solubilisés dans les lacs acidifiés. Cet aspect est encore fort peu documenté.

8.5 *La gestion du milieu atmosphérique au Québec*

Le premier règlement adopté au Canada par une autorité gouvernementale dans le but de réduire la pollution par les fumées l'a été par le Conseil municipal de Montréal en 1872 «afin de faire disparaître tout inconvénient résultant de l'exploitation d'engins à vapeur, bouilloires, manufactures, usines, fabriques ou ateliers». En 1901, Montréal applique aux établissements industriels et aux cheminées des maisons privées un règlement destiné à faire disparaître la nuisance de la fumée. En 1950, 1966 et 1970, elle devait adopter d'autres règlements de plus en plus sévères afin de réduire non seulement la fumée mais aussi les poussières, les vapeurs et les gaz nocifs rejetés dans l'atmosphère. Montréal devient la première ville canadienne à réglementer, en mars 1970, la teneur en soufre du mazout. La même année, la Communauté urbaine de Montréal, en vertu de la Loi de la Communauté urbaine de Montréal, prend la relève de la Ville de Montréal en matière de lutte à la pollution atmosphérique et adopte le Règlement 9 qui constitue une refonte des règlements montréalais de 1966 et de 1970.

C'est à cette époque que le gouvernement du Québec a commencé la lutte à la pollution atmosphérique en utilisant certaines dispositions de la Loi de l'hygiène publique du Québec avant d'adopter, en 1972, la Loi sur la qualité de l'environnement. Cette loi attribue notamment au ministre délégué à l'Environnement le pouvoir de réglementer la qualité de l'atmosphère sur l'ensemble du territoire québécois. Dans cette perspective, le ministère de l'Environnement, créé en 1979, recommandait la même année l'adoption d'un règlement sur la qualité de l'atmosphère en vigueur pour tout le Québec.

À la suite d'un protocole d'entente soustrayant la Communauté urbaine de Montréal de l'application de certains articles de la loi, cette dernière applique depuis 1979 un nouveau règlement portant sur l'assainissement de l'air de son territoire (Règlement 44). Ce règlement impose, entre autres, des limites à l'émission et à la présence de plus de 300 substances toxiques et des limites à la teneur en soufre des différents types de mazout destiné à la combustion. Il contient aussi plusieurs dispositions relatives aux émissions diffuses: utilisation d'abats-poussière lors des démo-

litions et des constructions, entretien des aires de circulation, interdiction d'employer à l'extérieur un jet abrasif à sec pour le ravalement ou la finition des surfaces, l'éradication de l'herbe à poux par les propriétaires, les utilisateurs ou les occupants des terrains.

En plus de la Loi sur la qualité de l'environnement et du Règlement sur la qualité de l'atmosphère, le ministère de l'Environnement du Québec voit à l'application d'autres règlements dont certains articles touchent la qualité de l'atmosphère: règlements s'adressant aux usines de pâtes et papiers, aux usines de béton bitumineux, aux carrières et sablières.

Le Règlement sur la qualité de l'atmosphère définit les concentrations maximales dans l'atmosphère d'un certain nombre de contaminants. Ces normes sont présentées à l'Annexe 2. Le Règlement détermine aussi des limites et des normes d'opacité d'émission de contaminants atmosphériques pour diverses catégories d'activités industrielles. Il fixe également la teneur en soufre à 2,5 pour cent pour le mazout lourd, à 1 pour cent pour le mazout intermédiaire et à 0,5 pour cent pour le mazout léger.

On estime qu'entre le début de 1982 et la fin de 1984, le secteur industriel a investi environ 132 000 000 $ pour l'assainissement des sources d'émission atmosphériques existantes. On croit au ministère de l'Environnement du Québec que ces investissements devront atteindre 700 000 000 $ à 850 000 000 $ à la fin de la décennie pour que les principales sources industrielles existantes soient conformes au Règlement sur la qualité de l'atmosphère.

Une modification de ce règlement adopté en février 1985 vise les émissions de SO_2 provenant des usines d'extraction de cuivre et l'usage du convertisseur catalytique destiné à limiter les émissions d'oxydes d'azote, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures. Cette modification s'inscrit dans le contexte de la réduction des émissions atmosphériques responsables des précipitations acides. En octobre 1985, des dispositions relatives à l'incinération des déchets dangereux ont été inclus dans le Règlement sur la qualité de l'atmosphère.

Certaines réglementations touchant l'émission de contaminants comme l'amiante, les polychlorures de vinyle, le mercure et le plomb, et adoptées par le gouvernement fédéral en vertu de la Loi sur la lutte contre la pollution atmosphérique sont aussi appliquées au Québec. Ce palier de gouvernement réglemente, par l'intermédiaire de Transport Canada, les émissions de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures et d'oxydes d'azote pour les véhicules neufs vendus au Canada. Ces normes sont également présentées en annexe.

Outre l'application de la réglementation, la Direction de l'assainissement de l'air du ministère de l'Environnement du Québec réalise, coordonne ou participe activement à la connaissance des divers aspects de la pollution atmosphérique: mise au point d'une méthode de mesure à la source des émissions d'hydrocarbures polycycliques aromatiques, développement d'un modèle de transport à longue distance des contaminants atmosphériques, projet de recherche sur l'utilisation du gaz naturel comme carburant pour les automobiles, étude sur les effets des oxydants sur les récoltes.

ANNEXE 1

CALCUL DE DISPERSION

Modèle gaussien de dispersion atmosphérique

Nous présentons ici un exemple de modèle de dispersion valable à l'intérieur de la couche limite. Comme tous les modèles mathématiques, celui-ci comporte plusieurs limitations dont les principales ont été énumérées au point 5.5. Le modèle gaussien de dispersion est basé sur l'équation de Pasquill-Gifford:

$$C(x,y,z;H) = \frac{Q}{2\pi\,\sigma_y\,\sigma_z u}\left(\exp\frac{-1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right)\left\{\exp\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right)+\exp\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right)\right\} \quad (1)$$

C est la concentration en polluant en g/m³ à un point de coordonné x, y, z.

Q est l'émission de polluants en g/s.

H est la hauteur effective de l'émission, soit la hauteur (h) de la source plus la hauteur due à la poussée exercée vers le haut ($\triangle$h). Il existe plusieurs équations fort complexes pour calculer h, mais nous ne nous attarderons pas sur ce paramètre.

u est la vitesse du vent en m/s.

σ_y et σ_z, les déviations moyennes de la distribution des concentrations dans le panache, horizontale et verticale. Ces paramètres sont déterminés en fonction de la distance de la source et de la catégorie établies. La classification suivante est souvent employée.

Classes de stabilité atmosphérique (PASQUILL-GIFFORD)

VITESSE DU VENT à 10 m (en m/s)	JOUR Rayonnement solaire incident			NUIT	
	Fort	Modéré	Léger	Légèrement couvert ou >4/8 nuage bas	<3/8 nuage
2	A	A-B	B	—	—
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
6	C	D	D	D	D

Un rayonnement solaire fort correspond à une altitude solaire supérieure à 60° avec un ciel clair, léger à une altitude solaire de 15 à 35° avec un ciel clair. Une couverture de nuage de 5/8 à 7/8 réduira un rayonnement fort à modéré. Toutes ces données sont valables pour une zone rurale et ouverte, mais moins sûres pour une zone urbaine. La différence la plus grande apparaît dans les nuits claires et calmes qui sont stables ou très stables en zone rurale et légèrement instables ou voisines de neutre en zone urbaine jusqu'à plusieurs fois la hauteur moyenne des immeubles, avec une couche stable au-dessus.

Deux graphiques présentés plus loin permettent d'évaluer les coefficients de dispersion pour une durée d'échantillonnage d'environ 10 minutes en fonction de la distance sous le vent de la source pour les différentes catégories de stabilité.

Pour une source d'une hauteur effective H et un point au niveau du sol à une distance x sous le vent de la source, et y de l'axe des x, l'équation (1) est simplifiée de la façon suivante:

$$C(x,y,0;H) = \frac{Q}{\pi\,\sigma_y\,\sigma_z u}\exp\left\{\frac{-1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right\}\exp\left\{\frac{-1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_y}\right)^2\right\} \quad (2)$$

Pour une source d'une hauteur effective H et un point au niveau du sol à une distance x sous le vent de la source, l'équation (1) devient:

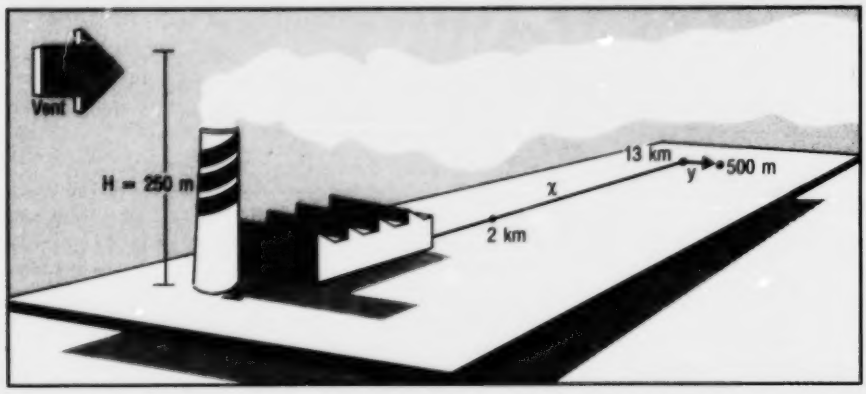
$$C(x,0,0;H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \frac{-1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2 \qquad (3)$$

Pour une source au niveau du sol et un point au niveau du sol à une distance x sous le vent de la source, l'équation (1) est réduite à:

$$C(x,0,0;0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \qquad (4)$$

Problème 1

Le combustion d'un amas de feuilles mortes émet 600 g/s de monoxyde de carbone. Quelle est la concentration moyenne de ce contaminant à 500 m de la source par une nuit claire avec un vent de 4 m/s? On suppose que le cours est situé au niveau du sol sans hauteur effective de panache.



Solution

Ces conditions correspondent à une classe de stabilité E.

On applique la formule (4). Pour x = 500 m, on estime que σ_y = 27 m et σ_z = 13 m en utilisant les graphiques A et B.

$$C(500\text{ m}, 0, 0{:}0) = \frac{600}{\pi(27)\,(13)\,(4)} \text{ g/m}^3$$

$$= \frac{600}{4\,410{,}80} \text{ g/m}^3$$

$$= 0{,}14 \text{ g/m}^3$$

$$= 140 \text{ mg/m}^3$$

Problème 2

[illegible]

Solution

Ces conditions correspondent à une classe de stabilité B. Pour x = 500 m, on estime que σ_y = 82 m et σ_z = 51 m en utilisant les graphiques A et B.

$$C(500\text{ m}, 0, 0{:}0) = \frac{600}{\pi(82)\,(51)\,(4)} \text{ g/m}^3$$

$$= \frac{600}{52\,552{,}56} \text{ g/m}^3$$

$$= 0{,}01 \text{ g/m}^3$$

$$= 10 \text{ mg/m}^3$$

Problème 3

[illegible]

Solution

Ces conditions correspondent à une stabilité de classe D.

a) pour x = 2 km, on estime que σ_y = 130 m et σ_z = 50 m en utilisant les graphiques A et B.

On applique alors la formule (3).

$$C(2\text{ km}, 0, 0{:}250\text{ m}) = \frac{15\,000}{\pi(130)\ (50)\ (5)} \exp \frac{-1}{2}\left(\frac{250}{50}\right)^2 \text{ g/m}^3$$

$$= 0{,}15 \exp(-12{,}5) \text{ g/m}^3$$

$$= 0{,}15 \times (3{,}73 \times 10^{-6}) \text{ g/m}^3$$

$$= 0{,}56 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$$

$$= 0{,}56 \text{ µg/m}^3$$

b) pour x = 13 km, σ_y = 700 m et σ_z = 160 m en utilisant les graphiques A et B.

$$C(13\text{ km}, 0, 0{:}250\text{ m}) = \frac{15\,000}{\pi(700)\ (160)\ (5)} \exp \frac{-1}{2}\left(\frac{250}{160}\right)^2 \text{ g/m}^3$$

$$= 8{,}53 \times 10^{-3} \exp(-1{,}22) \text{ g/m}^3$$

$$= 8{,}53 \times 10^{-3}\,(0{,}295) = 0{,}0025 \text{ g/m}^3$$

$$= 2\,500 \text{ µg/m}^3$$

Problème 4

[illegible]

Solution

a) pour x = 2 km, on a σ_y = 200 m et σ_z = 115 m établis en utilisant les graphiques A et B.

$$C(2\text{ km}, 0, 0{:}250\text{ m}) = \frac{15\,000}{\pi(200)\ (115)\ (5)} \exp \frac{-1}{2}\left(\frac{250}{115}\right)^2 \text{ g/m}^3$$

$$= 0{,}0415 \exp(-2{,}36) \text{ g/m}^3$$

$$= 0{,}0415\,(0{,}0944) \text{ g/m}^3$$

$$= 3{,}92 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$$

$$= 3\,920 \text{ µg/m}^3$$

b) pour x = 13 km, on a σ_y = 1050 m et σ_z = 640 m établis en utilisant les graphiques A et B.

$$C(13\text{ km}, 0, 0{:}250\text{ m}) = \frac{15\,000}{\pi(1\,050)\ (640)\ (5)} \exp \frac{-1}{2}\left(\frac{250}{640}\right)^2 \text{ g/m}^3$$

$$= 0{,}0014 \exp(-0{,}076) \text{ g/m}^3$$

$$= 0{,}0014\,(0{,}9265) \text{ g/m}^3$$

$$= 1{,}30 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$$

$$= 1\,300 \text{ µg/m}^3$$

Problème 5

[redacted]

Solution

On applique la formule (2).

$$C(13\text{ km}, 500\text{ m}, 0{:}250) = \frac{15\,000}{\pi(700)\,(160)\,(5)} \exp\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{250}{160}\right)^2\right) \exp\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{500}{700}\right)^2\right) \quad \text{g/m}^3$$

ou encore

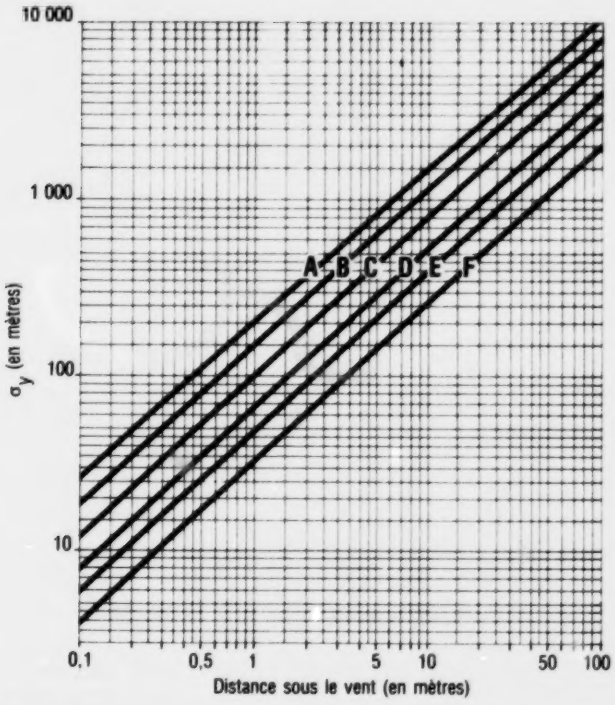
$$C(13\text{ km}, 500\text{ m}, 0{:}250\text{ m}) = (C(13\text{ km}, 0, 0){:}250\text{ m}) \exp\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{500}{700}\right)^2\right) \quad \text{g/m}^3$$

$$= 0{,}0025\ \text{g/m}^3 \times \exp(-0{,}26) \quad \text{g/m}^3$$

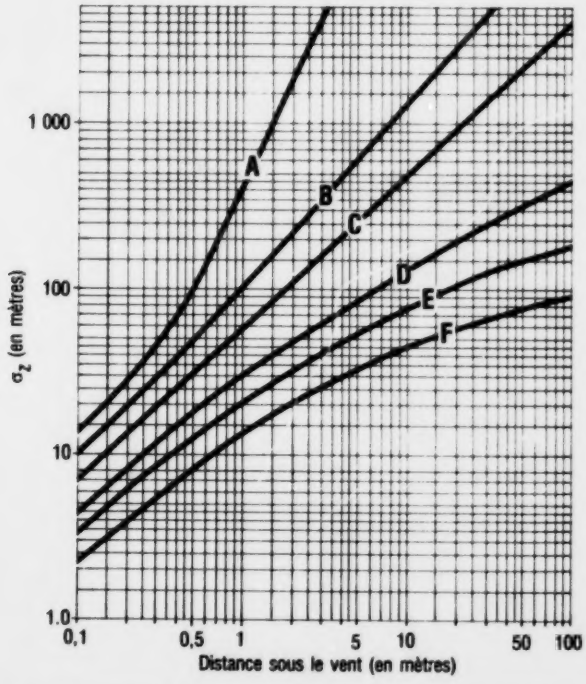
$$= 0{,}0025\ \text{g/m}^3 \times 0{,}77 \quad \text{g/m}^3$$

$$= 1{,}925 \times 10^{-3} \quad \text{g/m}^3$$

$$= 1\,925 \quad \mu\text{g/m}^3$$



GRAPHIQUE A — **Coefficient de dispersion horizontale (σ_y) en fonction de la distance sous le vent d'une source**



GRAPHIQUE B — **Coefficient de dispersion verticale (σ_z) en fonction de la distance sous le vent d'une source**

ANNEXE 2

QUELQUES NORMES TOUCHANT LA QUALITÉ DE L'ATMOSPHÈRE AU QUÉBEC

Quelques normes touchant la qualité de l'atmosphère au Québec

Principales normes québécoises de la qualité de l'air et milieux récepteurs à protéger

CONTAMINANTS	PÉRIODE DE RÉFÉRENCE		RÉCEPTEURS
Dioxyde de soufre	**moyenne annuelle:**	**0,02 ppm**	**végétation biens matériels**
	moyenne sur 24 heures:	**0,11 ppm**	**santé**
	moyenne sur 1 heure:	**0,50 ppm**	**végétation**
Particules en suspension	moyenne géométrique annuelle:	70 $\mu g/m^3$	santé (en association avec le dioxyde de soufre)
	moyenne sur 24 heures:	150 $\mu g/m^3$	visibilité
Monoxyde de carbone	**moyenne sur 8 heures:**	**13 ppm**	**santé**
	moyenne sur 1 heure:	**30 ppm**	**santé**
Ozone	moyenne sur 1 heure:	0,08 ppm	végétation et performance physique
Dioxyde d'azote	**moyenne annuelle:**	**0,05 ppm**	**santé**
	moyenne sur 24 heures:	**0,11 ppm**	**végétation**
	moyenne sur 1 heure:	**0,22 ppm**	**odeur**
Hydrogène sulfuré	moyenne sur 2 heures:	10 ppb	biens matériels
	moyenne sur 1 heure:	8 ppb	odeur
Plomb	**moyenne géométrique annuelle:**	**2 $\mu g/m^3$**	**santé**
Retombées de poussières	moyenne mensuelle: 7,5 t/km^2/mois		

Fluorures

Il est interdit d'émettre ou de dégager des fluorures dans l'environnement de telle sorte que ceux-ci excèdent les normes suivantes dans le fourrage destiné à l'alimentation des animaux et prélevé au-delà des limites de la propriété de la source d'émission:

CONCENTRATION PONDÉRALE SUR UNE BASE SÈCHE	DURÉE D'ÉCHANTILLONNAGE
40 ppm F –	moyenne sur 12 mois
60 ppm F –	moyenne mensuelle qui ne peut être excédée plus de deux mois consécutifs/année
80 ppm F –	moyenne mensuelle qui ne peut être excédée plus d'un mois/année

La moyenne des fluorures dans le fourrage pour une période de 12 mois s'établit sur des échantillons prélevés du 1er juin d'une année au 31 mai de l'année suivante. On procède à deux prélèvements par mois dans le fourrage, entre le 1er juin et le 31 octobre et, pour la période de temps comprise entre le 31 octobre et le 31 mai suivant, on utilise la moyenne des prélèvements effectués au cours des mois de récolte du fourrage avant le 31 octobre.

Normes canadiennes d'émission pour les véhicules neufs

CONTAMINANTS	NORMES ACTUELLES		EN VIGUEUR LE 1er SEPT. 1987	
	g/km	g/mi	g/km	g/mi
AUTOMOBILES				
Hydrocarbures	1,24	2,00	0,25	0,41
Monoxyde de carbone	15,50	25,00	2,11	2,40
Oxydes d'azote	1,92	3,10	0,62	1,00
Gaz d'évaporation (g/test)	24,00	24,00	2,00	2,00
Particules d'huile diesel	—	—	0,12	0,20
CAMIONNETTES				
Hydrocarbures	1,24	2,00	0,50	0,80
Monoxyde de carbone	15,50	25,00	6,51	10,00
Oxydes d'azote	1,92	3,10	1,43	2,30
Gaz d'évaporation (g/test)	24,00	24,00	2,00	2,00
Particules d'huile diesel	—	—	0,16	0,26

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

Liste des principaux documents consultés

Ouvrages généraux

Detrie, J.-P., 1979. **La pollution atmosphérique**, Paris, Dunod, 598 p.

Henderson-Sellers, B., 1984. **Pollution of our Atmosphere**, Bristol, Adam Hilger, 210 p.

Stern, A.C., 1973. **Fundamentals of Air Pollution**, New York, Academic Press.

Stern, A.C., 1976. **Air Pollution**, New York, Academic Press, 5 vols.

Contaminants atmosphériques

Chovin, P. et Roussel, A., 1973. **Physicochimie et physiopathologie des polluants atmosphériques**, Paris, Masson et Cie, 304 p.

Organisation mondiale de la santé, 1977. **Environmental Health Criteria 3: Lead**, enève, 160 p.

Organisation mondiale de la santé, 1977. **Environmental Health Criteria 4: Oxides of Nitrogen**, Genève, 80 p.

Organisation mondiale de la santé, 1979. **Environmental Health Criteria 7: Photochemical Oxidants**, Genève.

Organisation mondiale de la santé, 1979. **Environmental Health Criteria 8: Sulfur Oxides and Suspended Particulate Matter**, Genève, 107 p.

Organisation mondiale de la santé, 1979. **Environmental Health Criteria 13: Carbon Monoxide**, Genève.

Peterson, J.T. et Junge, C.E., 1971. «Sources of Particulate Matter in the Atmosphère», dans **Man's Impact on the Climate**, édité par W.H. Mathews, W.W. Kellogg et G.D. Robinson, Cambridge, MIT Press, pp. 310-320.

Service de protection de l'environnement, 1983. **Inventaire national des émissions atmosphériques**, Ottawa, Environnement Canada, 202 p.

Météorologie et météorologie de la pollution atmosphérique

Leduc, R. et Gervais, R., 1985. **Connaître la météorologie**, Québec, Presses de l'Université du Québec, 300 p.

Shaw, R.W. et Munn, R.E., 1971. «Air Pollution Meteorology», dans **Introduction to the Scientific Study of Atmospheric Pollution**, édité par B.M. Mc Cormac, Dordrecht, Reidel Publishing Company, pp. 53-96.

Technologie de limitation des émissions atmosphériques

Bethea, R.M., 1978. **Air Pollution Control Technology**, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 450 p.

Ross, R.D., 1972. **La pollution atmosphérique et l'industrie**, Paris, Entreprise moderne d'édition, 406 p.

Périodiques consacrés à la pollution atmosphérique

Atmospheric Environment.

Journal of Air Pollution Control Association.

Pollution atmosphérique.

Organismes et associations

Ami(e)s de la terre de Québec (Les)
C.P. 689
Haute-Ville
Québec (Québec) G1R 1K2

Association pour la prévention de la contamination atmosphérique (APCA)
C.P. 1777, succ. B
Montréal (Québec) H3B 3L3

Association québécoise de la lutte contre les pluies acides (AQLPA)
307, boulevard Henri-Bourassa Est
Montréal (Québec) H3L 1C2

Société de météorologie de Québec
Direction de la météorologie
2360, chemin Sainte-Foy
Sainte-Foy (Québec) G1V 4H2

Société pour vaincre la pollution (SVP)
C.P. 65, succursale Place d'Armes
Montréal (Québec) H2Y 3E9

Stop
1200, avenue Atwater
Westmount (Québec) H3Z 1X4

LEXIQUE

Lexique

Absorption: action de laisser pénétrer par réaction chimique une substance par une autre.

Accumulation: augmentation des concentrations de contaminants atmosphériques due à l'effet combiné des émissions et des conditions défavorables à leur dispersion.

Action bactérienne: action par laquelle des micro-organismes transforment une substance.

Adsorption: adhésion d'un gaz à la surface d'un solide sans impliquer une réaction chimique.

Aérosol: particules, liquides ou solides, dispersées dans l'air.

Air: mélange gazeux constituant l'atmosphère, composé surtout d'azote, d'oxygène, d'argon, de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau, souvent chargé de contaminants.

Atmosphère: air qui entoure la terre à l'exclusion de l'air qui se trouve à l'intérieur d'une construction ou d'un espace souterrain.

Atmosphère instable: lorsque la température de l'air décroît avec l'altitude à un taux supérieur au gradient adiabatique (sec ou humide).

Atmosphère neutre: lorsque la température de l'air décroît avec l'altitude à un taux égal au gradient adiabatique (sec ou humide).

Atmosphère stable: lorsque la température de l'air décroît avec l'altitude à un taux inférieur au gradient adiabatique (sec ou humide).

Basse pression (ou dépression): région de l'atmosphère où la pression est plus basse par rapport à son entourage.

Brise de mer: vent qui souffle de la mer le jour et qui est causé par une différence de température entre la mer et la terre.

Brise de terre: vent qui souffle de la terre la nuit et qui est causé par une différence de température entre la mer et la terre.

Brouillard: gouttelettes d'eau en suspension dans l'atmosphère, réduisant la visibilité.

Brouillard acide: oxydes de soufre et acide sulfurique en suspension dans l'atmosphère.

Brouillard photochimique: mélange de contaminants secondaires incluant l'ozone et les nitrates organiques produits par réaction photochimique à partir des oxydes d'azote et des hydrocarbures.

Cancérogène: capable de provoquer une tumeur maligne.

Chlorophylle: matière colorante verte des plantes permettant la formation d'hydrates de carbone à partir du dioxyde de carbone.

Chlorose: décoloration des plantes.

Cils vibratiles: poils recouvrant l'épithélium des muqueuses du segment trachéo-bronchique.

Combustion: combinaison d'un composé organique avec l'oxygène.

Contaminant atmosphérique: toute matière susceptible d'altérer de quelque manière la qualité de l'atmosphère.

Contaminant primaire: contaminant qui demeure sous la même forme dans l'atmosphère qu'à son point d'émission.

Contaminant secondaire: contaminant produit à la suite de la transformation par réaction chimique ou photochimique d'un contaminant primaire dans l'atmosphère.

Couche limite atmosphérique: partie de l'atmosphère fortement influencée par la surface de la terre, d'une hauteur moyenne de 1 kilomètre environ à l'intérieur de laquelle sont émis, se dispersent, réagissent et sont transportés les contaminants atmosphériques.

Décomposition anaérobique: altération d'une substance par des micro-organismes dans un milieu dépourvu d'oxygène.

Décomposition des matières organiques: altération d'une substance organique.

Degré d'odeur: le volume exprimé en mètre cube, occupé par un mètre cube d'air contaminé lorsque celui-ci est dilué à la limite de perception olfactive.

Dépôt: adsorption ou absorption d'un contaminant à la surface du sol, des matériaux, de la végétation ou de l'eau.

Diffusion: dilution d'un contaminant dans l'atmosphère causée par la turbulence de l'air.

Dispersion: processus régi par l'action combinée du vent et de la diffusion.

Dose: la quantité d'un contaminant atmosphérique inhalé ou absorbé.

Durée de séjour: durée pendant laquelle un contaminant demeure dans l'atmosphère après son émission.

Écoulement de retour: mouvement de l'air engendré par des obstacles, qui peut provoquer des rabattements de panaches vers le sol, occasionnant ainsi des concentrations élevées de contaminants atmosphériques sous le vent des obstacles.

Effet de synergie: effet combiné de deux ou de plusieurs contaminants, qui est supérieur à l'addition des effets de chacun des contaminants.

Effets de littoral: divers types de circulations atmosphériques associées aux contraintes entre les températures ou entre les profils verticaux de température de la mer et de la terre, pouvant éventuellement causer des problèmes de pollution atmosphérique.

Effets de vallée: divers types de circulations atmosphériques associées aux contraintes entre les températures des pentes et celles du fond des vallées ou à des profils verticaux de température qui favorisent l'accumulation de contaminants atmosphériques.

Émissions anthropiques: émissions causées par les activités humaines.

Émissions atmosphériques: dégagement de contaminants dans l'atmosphère.

Émissions naturelles: émissions dues à des processus naturels, tels que les volcans, les feux de forêt, les embruns marins, la décomposition anaérobique dans les marécages, etc.

Enquête épidémiologique: étude établissant des rapports entre les maladies et divers facteurs de causalité.

Épisode de pollution: occurrence de concentrations exceptionnellement élevées de contaminants atmosphériques au cours de périodes de temps pouvant s'étendre à quelques jours.

Épithélium: tissu formant une membrane protectrice à la surface des muqueuses de la trachée, des bronches et de la surface alvéolaire.

Équilibre géostrophique: équilibre résultant entre la force du gradient de pression et la force de Coriolis.

Facteur d'émission: la quantité de contaminants émis par une activité en rapport avec le niveau de cette activité.

Facteurs biotiques: facteurs qui sont liés aux maladies, aux parasites, et qui affectent la croissance et la vie des végétaux.

Facteurs climatiques: facteurs qui sont liés à l'ensoleillement, à la température, à l'humidité, et qui affectent la croissance et la vie des végétaux.

Facteurs édaphiques: facteurs qui sont liés à la qualité du sol et de l'eau, et qui affectent la croissance et la vie des végétaux.

Facteurs étiologiques: facteurs de causalité des maladies (mode de vie, tabagisme, milieu de travail, pollution atmosphérique, etc.).

Force de Coriolis: force liée à la rotation de la terre, qui a pour effet de dévier le mouvement de l'air vers la droite dans l'hémisphère nord, vers la gauche dans l'hémisphère sud.

Force de friction: force qui diminue la vitesse du vent près du sol.

Force de gradient de pression: force créée par la différence de pression atmosphérique entre deux points.

Front: ligne de transition entre deux masses d'air.

Front chaud: partie arrière de l'air froid qui recule.

Front froid: portion la plus avancée d'une masse d'air froid en mouvement.

Fumée: matières particulaires émises dans l'atmosphère, résultant d'une combustion incomplète et en suspension dans l'atmosphère.

Gradient adiabatique sec: décroissance verticale de la température en air sec qui vaut 10° C par kilomètre.

Gradient de pression: différence de pression atmosphérique qui existe entre deux points divisés par la distance qui les sépare.

Gradient pseudo-adiabatique humide: décroissance verticale de la température en air saturé qui vaut 6,5 °C par kilomètre.

Haute pression (ou anticyclone): région de l'atmosphère où la pression est plus élevée par rapport à son entourage.

Inversion de température: augmentation de la température avec l'altitude.

Isobare: ligne de même pression atmosphérique.

Isotope: chacun des éléments de même numéro atomique, mais de masse atomique différente.

Limites d'inflammabilité: proportions minimales et maximales d'un gaz qui, lorsque mélangé avec l'air, lui permettent de s'enflammer et d'entretenir par lui-même sa combustion.

Longueur d'onde: distance entre deux crêtes de l'oscillation d'un champ magnétique dans l'espace.

Masse d'air: portion relativement grande de l'atmosphère où la température et l'humidité sont relativement uniformes.

Matières particulaires: particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère.

Mésopause: frontière entre la mésosphère et l'inosphère.

Mésosphère: partie de l'atmosphère qui s'étend de 50 km à 85 km d'altitude environ.

Millibar: unité de mesure de la pression atmosphérique couramment employée en météorologie (1 kPA = 10 mb).

Mucus: liquide protecteur à la surface des muqueuses.

Névrose: altération des tissus à la suite de la mort de ses cellules.

Normes de qualité de l'atmosphère: objectifs de qualité de l'atmosphère ayant un statut légal.

Objectifs de qualité de l'atmosphère: niveaux de qualité de l'atmosphère qui ne devraient pas être excédés pendant une période de temps déterminée. Ces objectifs n'ont pas de statut légal.

Oxydation: combinaison d'un corps avec l'oxygène.

Particules: voir *matières particulaires.*

pH: se définit comme moins le logarithme de la concentration en ions hydrogène ($-\log H^-$).

Photosynthèse: production par les plantes à chlorophylle d'hydrates de carbone à partir de dioxyde de carbone en utilisant comme énergie la lumière solaire.

Polluant: contaminant présent dans l'atmosphère en concentration ou en quantité supérieure à un seuil permis.

Pollution: état de l'environnement lorsqu'on y trouve un polluant.

Poussières: petites particules solides facilement mises en suspension dans l'atmosphère.

Pression atmosphérique: poids exercé par une colonne d'air de section unitaire à la surface de la terre.

Processus de dépôt humide: ensemble des mécanismes d'élimination des contaminants atmosphériques, qui englobent la capture par les gouttelettes à l'intérieur des nuages et le balayage par la pluie ou la neige.

Processus de dépôt sec: ensemble des mécanismes d'élimination des contaminants atmosphériques, qui englobent la sédimentation, la capture par la végétation, l'adsorption et la dissolution dans les lacs et les océans.

Rapport stœchiométrique: proportion suivant laquelle les composés chimiques réagissent de façon optimale.

Rayons infrarouges: énergie propagée sous forme de rayonnement non visible dont la longueur d'onde est supérieure à 0,8 micromètre et inférieure à 1 millimètre.

Rayons solaires: énergie émise par le soleil sous forme de rayonnement visible et invisible.

Rayons ultraviolets: rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est inférieure à 0,4 micromètre mais supérieure à 0,01 micromètre.

Réduction: élimination de l'oxygène d'un composé chimique.

Sédimentation: élimination par gravité des particules en suspension dans l'atmosphère.

Segment nasopharyngien: partie du système respiratoire comprenant le nez et le nasopharynx.

Segment pulmonaire: partie fonctionnelle du système respiratoire où s'effectuent les échanges gazeux entre l'air et le sang, se composant des bronchioles respiratoires, des conduits alvéolaires, des sacs alvéolaires et des alvéoles.

Segment trachéobronchique: partie du système respiratoire comprenant la trachée et l'arbre bronchique.

Smog: associé tout d'abord à un mélange de fumée (smog) et de brouillard (fog), ce terme est aujourd'hui utilisé pour désigner les problèmes de pollution qui impliquent une réduction de la visibilité.

Source: endroit où des contaminants sont émis dans l'atmosphère. Les sources peuvent être ponctuelles, diffuses ou linéaires, ou encore continues ou discontinues.

Source continue: source qui émet des contaminants de façon continue une grande période de temps.

Source diffuse: source dont les émissions sont considérées comme homogènes pour une zone donnée.

Source discontinue: source qui émet des contaminants de façon discontinue pendant de courtes périodes de temps.

Source linéaire: source dont les émissions sont considérées comme homogènes tout au long d'une zone très étroite pouvant être considérée comme une ligne.

Source ponctuelle: source dont la zone de transition dans l'atmosphère est considérée comme un point.

Stagnation: conditions météorologiques caractérisées par un air stable et des vents faibles qui persistent pendant plusieurs jours et qui peuvent occasionner des épisodes de pollution.

Stomates: orifices de l'épiderme des feuilles jouant un rôle essentiel à la respiration et à la transpiration des végétaux.

Stratopause: frontière entre la stratosphère et la mésosphère.

Stratosphère: partie de l'atmosphère qui s'étend de 12 km à 50 km d'altitude environ.

Système de contrôle intermittent: système basé sur des modèles de prévisions météorologiques et sur des données d'échantillonnage, qui permet aux industries de réduire leurs émissions afin de diminuer la fréquence et l'intensité des épisodes de pollution atmosphérique.

Thermosphère: partie de l'atmosphère se situant entre 85 et 600 km environ.

Transport à longue distance: transport par le vent de contaminants atmosphériques sur des distances de l'ordre de 1000 km.

Tropopause: frontière entre la troposphère et la stratosphère.

Troposphère: partie de l'atmosphère qui s'étend du sol jusqu'à une altitude moyenne de 12 km environ.

Turbulence: fluctuations plus ou moins rapides et intenses de la direction et de la vitesse du vent, qui influencent la diffusion des contaminants atmosphériques.

Turbulence mécanique: turbulence engendrée par des obstacles à l'écoulement de l'air.

Turbulence thermique: turbulence engendrée par l'instabilité thermique de l'atmosphère.

Vent anabatique: vent qui monte une pente.

Vent géostrophique: vent qui résulte de l'équilibre entre la force due au gradient de pression et la force de Coriolis.

Vent katabatique: vent qui descend une pente.

Visibilité: distance à laquelle un objet de dimension convenable peut être vu et identifié.

OÙ S'INFORMER

Où s'informer

Ministère de l'Environnement
Direction de l'assainissement de l'air

2360, chemin Sainte-Foy
Sainte-Foy (Québec) G1V 4H2
(418) 643-5559

Directions régionales du ministère de l'Environnement

Bas-Saint-Laurent — Gaspésie
Îles-de-la-Madeleine
337, rue Moreault
Rimouski (Québec) G5L 1P4
722-3511

Saguenay — Lac-Saint-Jean
3950, boulevard Harvey
(2e étage)
Jonquière (Québec) G7X 8L6
542-3565

Québec
917, avenue Mgr-Grandin
Sainte-Foy (Québec) G1V 3X8
644-6660

Mauricie — Bois-Francs
100, rue Laviolette
Trois-Rivières (Québec) G9A 5S9
373-7341

Estrie
209, rue Belvédère Nord
Sherbrooke (Québec) J1H 4A7
566-5882

Montréal
5199, rue Sherbrooke Est
bureau 3860
Montréal (Québec) H1T 3X9
873-3636

Outaouais
180, rue Hôtel-de-Ville
Édifice Jos-Montferrand
bureau 8100
Hull (Québec) H8X 4C2
770-0004

Abitibi-Témiscamingue
180, boulevard Rideau
(2e étage)
Noranda (Québec) J9X 1N9
762-6551

Côte-Nord
818, boulevard Laure
bureau 102
Sept-Îles (Québec) G4R 1Y8
962-3378

Nouveau-Québec
Case postale 390
Radisson (Québec) J0Y 2X0
638-8495 (téléphoniste 0)

Communauté urbaine de Montréal

Service de l'assainissement de l'air
9150, boul. de l'Acadie
Montréal (Québec) H4N 2T2

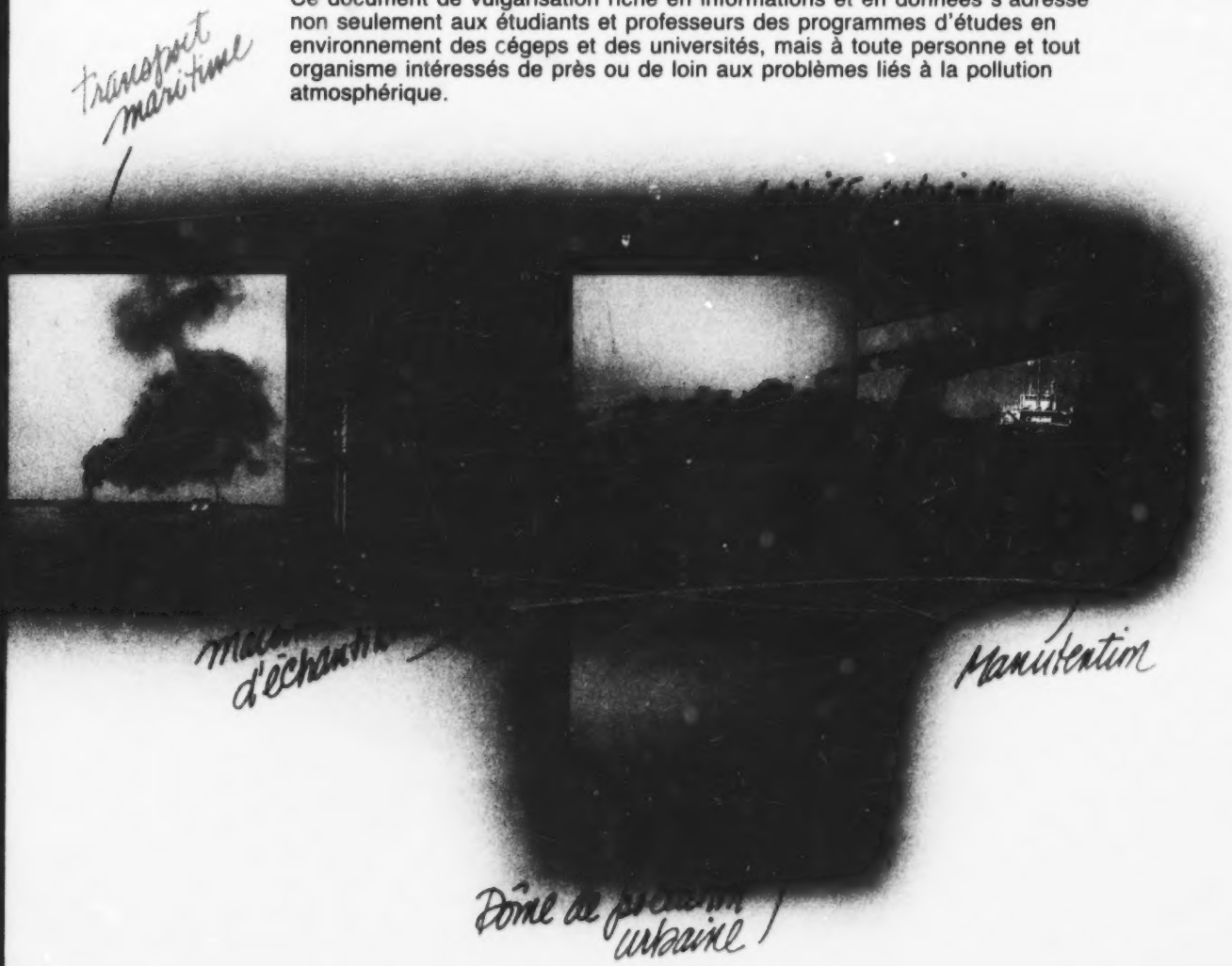
DÉFENSE
DE JETER
DES DÉCHETS

INTRODUCTION À LA
POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Nul ne peut échapper à la pollution atmosphérique. En effet, dans nos sociétés modernes, les activités industrielles, agricoles et de transport engendrent un accroissement considérable des émissions de polluants atmosphériques. La pollution de l'air cause des effets indésirables sur la santé humaine, la végétation, les animaux et les biens matériels.

Le présent ouvrage démystifie et aide à comprendre ce phénomène. Il présente dans un langage accessible des notions de base essentielles sur les structures et la composition de l'atmosphère, décrit les différents contaminants et explique le processus atmosphérique régissant leur transport et leur transformation. On y traite des effets de ces contaminants sur la santé, les animaux, la végétation et le milieu atmosphérique et l'on y aborde les méthodes de prévention et la gestion de la pollution atmosphérique. Un aperçu de la situation de la pollution atmosphérique au Québec ajoute un intérêt particulier à ces textes.

Ce document de vulgarisation riche en informations et en données s'adresse non seulement aux étudiants et professeurs des programmes d'études en environnement des cégeps et des universités, mais à toute personne et tout organisme intéressés de près ou de loin aux problèmes liés à la pollution atmosphérique.



Gouvernement du Québec
Ministère de l'Environnement

Imprimé au Québec, Canada